Série A. n° 1064
N° d'Ordre 1906

THÈSES

PRÉSENTÉES
A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS
POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. L. QUEVRON

Première Thèse

MESURE ÉLECTRIQUE DES PETITS INTERVALLES DE TEMPS

Deuxième Thèse

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 11 juin 1926, devant la Commission d'examen

Jury.... MM. A. COTTON — *Président.*
Ch. MAURAIN, H. MOUTON — *Examinateurs.*

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553825_0021

Série A. n° 1064
N° d'Ordre 1906

THÈSES

PRÉSENTÉES
A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS
POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. L. QUEVRON

Première Thèse

MESURE ÉLECTRIQUE DES PETITS INTERVALLES DE TEMPS

Deuxième Thèse

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le juin 1926, devant la Commission d'examen

Jury.... MM. A. COTTON *Président.*
Ch. MAURAIN } *Examinateurs.*
H. MOUTON

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen ..... M. Molliard, Professeur, Physiologie végétale.

Doyen honoraire .. P. Appell.

Professeurs honoraires
- P. Puiseux.
- V. Boussinesq.
- A. Joannis.
- H. le Chatelier.
- H. Lebesgue.
- A. Fernbach.

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Professeurs .....

Emile Picard	Analyse supérieure et algèbre supérieure.
G. Kœnigs	Mécanique physique et expérimentale.
E. Goursat.....	Calcul différentiel et calcul intégral.
P. Janet.....	Electrotechnique générale.
F. Wallerant.....	Minéralogie.
H. Andoyer.....	Astronomie.
P. Painlevé.....	Mécanique analytique et mécanique céleste.
E. Haug	Géologie.
Gabriel Bertrand..	Chimie biologique.
Mme P. Curie.....	Physique générale et radioactivité.
M. Caullery.....	Zoologie (évolution des êtres organisés).
C. Chabrié.....	Chimie appliquée.
G. Urbain.....	Chimie minérale.
Emile Borel.....	Calcul des probabilités et Physique mathématique.
L. Marchis.....	Aviation.
Jean Perrin.....	Chimie physique.
H. Abraham.....	Physique.
E. Cartan.....	Géométrie supérieure.
L. Lapicque.....	Physiologie générale.
E. Vessiot.....	Théorie des groupes et calcul des variations.
A. Cotton.....	Physique générale.
J. Drach.....	Application de l'analyse à la géométrie.
Charles Fabry....	Physique.
Charles Pérez.....	Zoologie.
A. Leduc.....	Physique théorique et physique céleste.
Léon Bertrand....	Géologie appliquée et géologie régionale
R. Lespieau.....	Théories chimiques.
E. Rabaud.....	Biologie expérimentale.
P. Portier.....	Physiologie comparée.
E. Blaise.....	Chimie organique.
P.-A. Dangeard....	Botanique.
C. Maurain.....	Physique du globe.
P. Montel.....	Mécanique rationnelle.
P. Wintrebert....	Anatomie et histologie comparées.
O. Duboscq.....	Biologie maritime.
G. Julia.....	Mathématiques générales.
A. Job.....	Chimie générale.
N.	Géographie physique.
N.	Chimie (Enseignement P. C. N.).
E. Hérouard.....	Zoologie.
Rémy Perrier....	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
G. Sagnac.....	Physique théorique et physique céleste.
E. Péchard.....	Chimie (Enseignement P. C N.)
V. Auger.....	Chimie analytique.
M. Guichard.....	Chimie minérale.
A. Guillet.....	Physique.
C. Mauguin.....	Minéralogie.
L. Blaringhem.....	Botanique.
A. Michel-Lévy...	Pétrographie.
A. Dereims	Géologie.
R. Dongier.....	Physique du globe.

Secrétaire ..... Daniel Tombeck.

A mes parents,

mes frère et sœurs

A mes Maîtres

M. A. COTTON

Membre de l'Institut, Directeur du Laboratoire
des Recherches Physiques à la Sorbonne

M. H. OLLIVIER

Professeur à la Faculté des Sciences de Strasbourg

Hommage
très respectueux

A Messieurs

J.-L. BRETON

Membre de l'Institut, Directeur de l'Office National des Recherches et Inventions

L. JOLY

Ingénieur, Président du Comité technique du Génie à l'Office National des Recherches et des Inventions

Mesure électrique des petits intervalles de temps

par L. QUEVRON

INTRODUCTION

Le présent travail a été exécuté au Laboratoire de physique de l'Office National des Recherches et Inventions; il a pour objet la *mesure électrique des petits intervalles de temps* (de l'ordre du centième de seconde par exemple).

Le procédé de mesure employé est celui qui avait servi pendant la guerre dans les Sections de repérage par le son Cotton-Weiss : les temps à mesurer se déduisent d'une lecture directe sur le cadran d'un fluxmètre. Mais ces temps étant plus courts, il faut envoyer dans le circuit de mesure des courants plus intenses pour que l'aiguille du fluxmètre, dont la vitesse croît avec les tensions appliquées, se déplace de quantités suffisantes sur l'échelle graduée de l'instrument.

En 1918, à la demande du Président de la Commission de Gâvre, qui était alors M. Houssette, MM. Cotton et Ollivier avaient fait à Paris et à Gâvre, avec le concours de la Direction des Inventions, des expériences qui avaient montré que le fluxmètre, avec quelques précautions nécessaires, peut servir à repérer des temps aussi courts; il reste fidèle et donne des indications bien concordantes. C'est ce qu'avaient montré en particulier des séries de mesures de vitesses de projectiles faites sur des bases très courtes (on est descendu jusqu'à 5 mètres), concurremment avec les appareils ordinaires du polygone : ces derniers étaient reliés eux-mêmes à des cadres-cibles distants d'une centaine de mètres par exemple.

Mais il restait à étudier *l'étalonnage* de cet appareil pour ces temps très courts, la proportionnalité des déviations aux temps ne pouvant plus être admise sans vérification soignée dans ces conditions nouvelles. C'est cette étude qui est décrite ici; les temps très courts sont produits avec un lourd volant, tournant d'un mouvement très régulier, portant des leviers qui produisent des ruptures séparées par un intervalle de temps réglable. Le temps se mesure directement à l'aide d'un diapason à enregistrement photographi-

que. L'enregistrement se fait sur la plaque immobile, grâce à un miroir monté sur l'axe du volant lui-même. On compare les temps ainsi mesurés aux indications de l'appareil à lecture directe.

Le résultat est que l'on peut admettre la loi simple de proportionnalité des lectures aux temps à mesurer. Avec l'appareil actuel l'erreur relative est de l'ordre de $\frac{1}{500}$ et l'erreur absolue de l'ordre du cent millième de seconde.

Le travail a été complété par une étude théorique et expérimentale d'autres questions qui se sont posées dans l'emploi du fluxmètre : influence de la self-induction, de la résistance de l'air sur le mouvement du cadre, etc...

*
* *

Avant de passer à l'exposé de mes recherches j'ai l'agréable plaisir d'exprimer ma très vive reconnaissance :

à M. A. Cotton, Membre de l'Institut, Directeur du Laboratoire des Recherches Physiques à la Sorbonne, sous la direction duquel ces recherches ont été entreprises et dont la haute compétence m'a évité bien des tâtonnements ;

à M. J. L. Breton, Membre de l'Institut, Directeur de l'Office National des Recherches scientifiques et des Inventions, qui a bien voulu m'accueillir dans ses laboratoires et mettre à ma disposition les puissantes ressources de l'Office ;

à M. H. Ollivier, Professeur à la Faculté des Sciences de Strasbourg, qui m'a orienté dans la voie de la recherche et m'a toujours donné de précieux conseils ;

à M. L. Joly, Président du Comité technique du Génie, dont les libéralités m'ont permis d'acquérir une partie du matériel qui m'était nécessaire.

Je ne saurais oublier de remercier cordialement le personnel du Service photographique que dirige M. le Docteur Commandon, du Service électrique et des Ateliers.

PREMIERE PARTIE

Principe de la mesure d'un intervalle de temps

Pour mesurer un intervalle de temps, ayant des frontières bien définies, on repère la position des frontières (commencement et fin) par rapport à une variable auxiliaire S présentant des variations périodiques.

La variable auxiliaire adoptée pour le repèrage peut être :

la rotation de la terre par rapport aux étoiles fixes ou considérées comme telles ;

la longueur de l'arc parcouru par l'extrémité d'une aiguille sur un cadran (horloge, chronomètre) ;

la longueur qui sépare les époques remarquables d'un phénomène enregistré sur une feuille de papier se déplaçant de façon connue ;

l'espace parcouru par une onde sonore, balistique, lumineuse ou électrique ;

la quantité de liquide ou d'électricité qui s'écoule pendant l'intervalle de temps à mesurer.

Quelle que soit la méthode adoptée, il faut que les frontières du phénomène observé soient très nettes, c'est-à-dire que le début et la fin se manifestent brusquement.

Nous étudierons dans un premier chapitre les moyens qui permettent d'obtenir des intervalles de temps très petits à frontières bien définies.

Dans un second chapitre nous verrons comment on transmet ces manifestations aux appareils de mesure, qui peuvent se classer en deux catégories :

a) Les appareils enregistreurs qui inscrivent simultanément l'intervalle de temps étudié et les indications d'un étalon de temps ;

b) Les appareils à lecture directe qui nécessitent un étalonnage préalable.

Nous ne prétendons pas d'ailleurs faire un historique complet et un examen critique de tous ces appareils ; nous insisterons surtout sur ceux qui nous ont servi nous-mêmes.

Chapitre I

Etude des appareils permettant d'obtenir de petits intervalles de temps

1° *Les cadres-cibles.* — On place devant une bouche à feu perpendiculairement à la trajectoire deux cadres C_1, C_2; sur chacun d'eux est tendu un fil conducteur. Le projectile rompt le premier circuit C_1, puis le

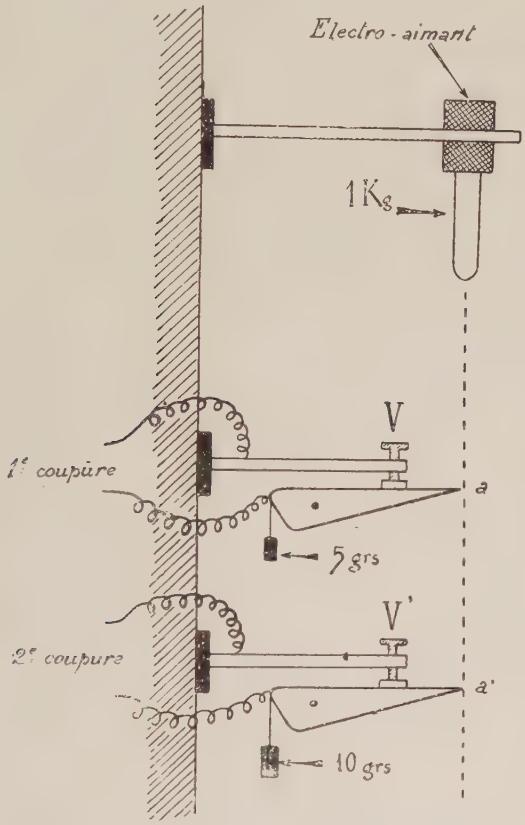


Fig. 1

second C_2; l'intervalle de temps T qui sépare les deux ruptures est enregistré par les appareils décrits au chapitre II. Pouillet (1) employait simplement deux fils tendus dont il provoquait la rupture au moyen d'une balle de fusil, il obtenait ainsi des temps de l'ordre de $\frac{1}{150}$ seconde.

2° *Les appareils de chute.* — Basés sur la loi de la chute des corps, ils sont destinés à la production d'un intervalle de temps bien déterminé et peuvent servir à la vérification des chronographes ordinaires ou à l'étalonnage des appareils de mesure. Ils sont basés sur la loi de la chute des corps et se composent essentiellement d'un poids tombant d'une hauteur connue et rompant successivement en deux points de son trajet deux circuits électriques.

Le temps qui sépare la rupture des courants doit être reproduit par le chronographe dont on étudie la précision, ou sert à établir la courbe d'étalonnage d'un appareil.

a) *Appareil à chute de Le Roux* (2). — Un poids de 1 kg. tombe en faisant basculer les leviers *a* et *a'* qui portent chacun un contact (fig. 1).

L'appui de ces contacts sur les vis V V' est obtenu au moyen d'un poids de 5 grs et d'un poids de 10 grs pour le second interrupteur, pour éviter les vibrations.

On règle la distance des interrupteurs entre eux et la distance du premier interrupteur au poids pour faire varier le temps qui sépare les deux coupures.

b) *Appareil à chute de Bréger.* — Les deux courants électriques qui doivent être rompus successivement passent dans des fils de cuivre très fins A B, A' B' placés à une distance convenable. Un poids (3 kgs) portant un couteau tombe sans vitesse initiale d'une hauteur connue et coupe chacun des 2 fils.

c) *Appareil à chute* (fig. 2). — L'appareil qui a servi à l'étalonnage des appareils de repérage par le son de MM. Cotton et Weiss se compose, sous la forme que lui a donné M. Ollivier, d'un fort bâti en chêne, à deux montants verticaux bien dressés. Le long du premier peut coulisser la pièce supérieure A de l'appareil d'où tombera la

(1) Pouillet. *Eléments de Physique expérimentale et de Météorologie*, tome I, page 818. — C. R., t. XIX, 1844.

(2) Le Roux. *Annales de Chimie et de Physique*, page 345, t. XII, 1867.

bille. Le long du second on peut fixer la pièce inférieure B, qui recevra la bille. La pièce supérieure comprend une petite balance dont le fléau porte d'un côté un contrepoids Q_1 et une lame de platine qui vient s'appuyer sur la pointe en or d'une vis V_1 isolée électriquement.

L'autre extrémité du levier supporte un électro-aimant E_1 placé, avec interposition d'une clef de Morse, dans le circuit d'une batterie d'accumulateurs. Quand l'électro est excité, il est capable de retenir une bille d'acier ($d = 14$ m/m). Le poids de cette bille maintient le fléau horizontal, la plaque de platine s'appuie sur la vis V_1 qui fait butoir et le contact est établi. Quand on appuie sur la clef, la bille tombe et le fléau bascule en abandonnant la vis V_1 (première coupure).

La pièce inférieure se compose, elle aussi, d'une petite balance semblable à la première logée au-dessous d'une plaque métallique P qui reçoit le choc de la bille. Cette balance est munie d'un petit électro E_2 semblable à E_1 mais où le courant passe en permanence, et qui retient (tout juste) la bille d'acier. Tant que cette bille est accrochée au bout du noyau qui l'attire, le fléau reste horizontal et le contact est établi entre une plaque de platine et la vis V_2. Mais quand la bille tombante vient frapper la pièce inférieure, elle provoque la chute de la seconde bille, le renversement du fléau et la rupture du second contact.

La hauteur de chute est mesurée au moyen d'étalons à bouts.

3° *Les rupteurs électro-acoustiques.* — Ces appareils utilisent les phénomènes sonores des projectiles. Ils doivent saisir l'instant du passage de l'onde sonore en un point donné, ce sont des appareils de « topage ». Ils fonctionnent comme des commutateurs très sensibles dès qu'une petite variation de pression se produit dans leur voisinage.

Nous citons ces appareils parce qu'ils permettent théoriquement d'obtenir de petits intervalles de temps en profitant du fait qu'une onde sonore se propage avec une vitesse finie et connue. Mais nous avons rencontré dans cette voie des difficultés tenant notamment à l'influence du vent, qu'il est difficile d'éliminer. Pour cette raison, nous ne parlerons pas en détails de ces appareils, de ceux en particulier qui ont servi pour le repérage par le son.

4° *Les oscillographes.* — Dans tous les systèmes précédents l'intervalle de temps est marqué par des phénomènes présentant une discontinuité (rupture de courant par exemple). Il n'est pas nécessaire qu'il y ait discontinuité : une variation rapide dans l'intensité d'un courant pourra nous servir à marquer le début ou la fin d'un phénomène.

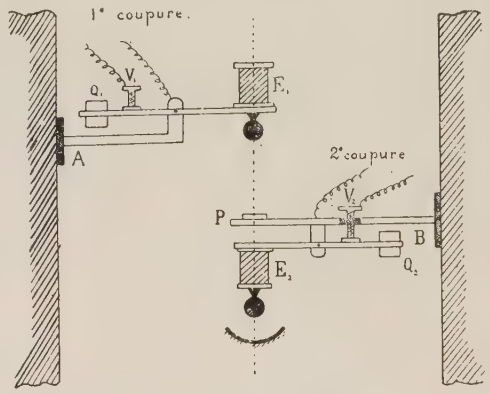


Fig. 2

Le courant variable qui prend naissance pendant l'intervalle de temps à mesurer agit sur l'équipage d'un oscillographe Blondel ou Duddell, ou bien sur un rayon cathodique comme dans l'oscillographe Dufour.

Ces appareils sont associés à un enregistreur.

Chapitre II

Etude des appareils de mesure des petits intervalles de temps

a) Etude des appareils enregistreurs

C'est vers 1840 que l'emploi de l'électricité et l'usage des électro-aimants permirent aux inventeurs de réaliser des chronogra-

phes (1). Chacun de ces appareils, au moment de sa mise en service, représentait la meilleure solution qu'on eût trouvée de la question de la mesure du temps.

1° *Chronoscope de Wheatstone* (1840).

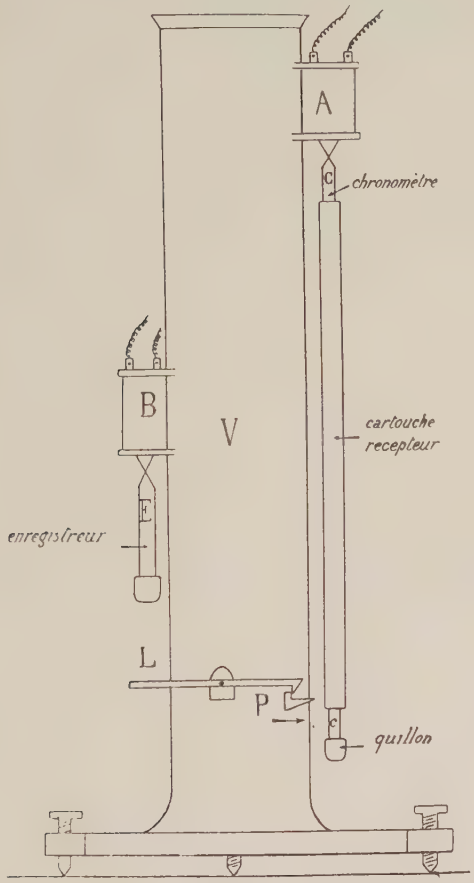


Fig. 3

— Deux pendules de période légèrement différente peuvent osciller autour d'un même axe horizontal, chacun d'eux est maintenu à l'extrémité commune de leur arc d'oscillation par un électro-aimant.

(1) On trouvera un historique détaillé sur les chronographes dans l'étude de MM. Charbonnier et Gally-Aché sur la mesure de la vitesse des projectiles (*Mémorial de l'Artillerie*, t. XXIX. 1901, et le *Traité sur la Poudre*, par Désortiaux, Paris, Dunod, 1878).

Le phénomène A libère le premier pendule et le phénomène B le second. Le retard du second pendule sur le premier représente l'intervalle de temps à évaluer. On compte le nombre d'oscillations de l'un des pendules jusqu'à ce qu'on observe la coïncidence. Si θ est la différence des durées des oscillations des deux pendules, N le nombre d'oscillations qui précède la coïncidence, $N\theta$ est l'intervalle de temps cherché.

2° *Chronoscope Navez* (1849). — La partie essentielle de l'appareil est un pendule muni d'une lentille en laiton, une aiguille se déplace devant un limbe divisé en même temps que le pendule. Le pendule est maintenu à sa position initiale par un électro-aimant qui agit sur une pièce de fer fixée à la lentille. Un second électro-aimant qui agit sur un disque en fer fixé à l'aiguille peut arrêter celle-ci sans empêcher pour cela le mouvement du pendule.

On mesure ainsi l'intervalle de temps qui sépare la rupture du courant dans le premier électro et l'établissement du courant dans le second. Pour évaluer les retards de l'appareil, Navez y avait adjoint un petit instrument appelé *disjoncteur*.

Le chronoscope Navez, modifié par Leurs, a été utilisé jusqu'à l'apparition du chronographe Le Boulangé.

3° *Chronographe Le Boulangé - Bréger* (1864-1876). — On mesure le temps T qui sépare les ruptures successives de deux courants électriques en faisant tomber pendant le même temps une tige C appelée *chronomètre*. Les lois de la chute des corps étant parfaitement connues, il est facile de remonter de la longueur de la chute à sa durée et de connaître ainsi le temps cherché.

L'appareil (fig. 3) se compose d'une colonne verticale V portant deux électro-aimants, l'un fixe A, l'autre mobile B.

Le *chronomètre* est suspendu à A, on revêt la tige du chronomètère d'un tube à paroi mince en cuivre rouge, destiné à recevoir les inscriptions, et que l'on appelle *cartouche récepteur*.

Si l'on rompt le circuit de l'électro A le chronomètre est mis en liberté et tombe alors

librement en suivant la loi de la chute des corps.

Une seconde tige cylindrique plus courte E appelée *enregistreur* est suspendue à l'électro B, elle a le même poids que le chronomètre revêtu de son cartouche. Si l'on coupe le circuit B l'enregistreur est à son tour mis en liberté, mais il se trouve arrêté par une détente composée d'un levier L et d'un couteau P monté sur un ressort qui agit dans le sens de la flèche.

Le choc libère le couteau qui marque sur la surface du cartouche récepteur une encoche bien nette. L'encoche O obtenue lorsque le chronomètre est suspendu à A marque l'origine des hauteurs de chute.

La rupture du premier circuit provoque la chute du chronomètre.

La rupture du second circuit provoque la chute de l'enregistreur qui, frappant le levier L, libère le couteau P. Celui-ci marque sur le chronomètre une encoche X. La position de cette encoche sur le chronomètre dépend évidemment de la quantité dont ce dernier s'est déplacé, c'est-à-dire du temps T qui s'est écoulé entre les origines des chutes des deux tiges. De la longueur O X on déduit le temps T.

Mais, d'une part, la chute de l'enregistreur, d'autre part, le déclanchement et la course du ressort, exigent un certain temps dont il faut tenir compte. On y parvient par un artifice qui consiste à faire tomber simultanément les deux tiges en rompant en même temps les courants des deux électro-aimants qui les supportent. Le couteau frappe le chronomètre en X'. La distance O X' représente l'espace parcouru avant de recevoir le choc du couteau (s'il n'y avait pas de retard O X' serait nul). Dans les mesures ultérieures il suffira de retrancher ce parcours O X' du parcours réellement observé O X pour faie disparaître les erreurs. L'appareil qui est destiné à rompre simultanément les circuits est appelé *disjoncteur*.

Pour la commodité des calculs on s'arrange pour que O X' = 110,37 m/m, ce qui correspond à un temps de chute de 0,15 sec. On obtient ainsi des temps de l'ordre de 0,1 sec. avec une précision de $\frac{1}{1000}$

Si l'on voulait mesurer avec cet appareil un temps inférieur à 0,1 sec., la distance X X' serait très petite et les encoches sur le cartouche récepteur seraient moins nettes. Pour accroître la distance X X' on doit s'arranger pour que le trait X se fasse à la partie supérieure du chronomètre, là où la vitesse est la plus grande; par conséquent, de faibles différences en temps sont traduites par de grandes différences en hauteur. Dans ce cas on place l'enregistreur avec son électro-aimant au sommet de la colonne V, de façon que la disjonction corresponde à un temps de 0,3 sec. au lieu de 0,15 sec. La vitesse du chronomètre est donc doublée ainsi que l'espace représentatif des temps très courts.

Remarque. — Le Boulangé a imaginé aussi d'employer comme chronomètre, l'écoulement d'un liquide. Il détermine le temps par le poids de mercure écoulé pendant l'intervalle à mesurer, d'où le nom de *clepsydre* donné au nouvel appareil. Un millième de seconde correspond à un poids de mercure écoulé de 0,006 gr.

4° *Appareil d'enregistrement au noir de fumée.* — Ce procédé, très souvent employé dans les laboratoires de physique, consiste à recouvrir de noir de fumée, soit une feuille enroulée sur le cylindre enregistreur, soit une bande qui se déroule. Ce noir de fumée s'enlève au plus léger contact d'un inscripteur Pour la conservation des graphiques on peut, après inscription, passer le papier dans un bain de fixatif (alcool et gomme laque) ou bien employer le procédé imaginé par M. Abraham, qui consiste à laminer la feuille à l'aide d'un petit laminoir.

On enregistre simultanément sur le cylindre noirci et animé d'un mouvement de rotation, les signaux à l'instant même où ils se produisent et les vibrations d'un diapason.

Comme appareils utilisant ce mode d'inscription citons :

1° *Le chronographe Schultz* (1) 1864. — Les signaux inscripteurs étaient produits par

(1) Charbonnier et Gally-Aché. *Mémorial de l'Artillerie de Marine*, t. XXIX, 1901.

une étincelle électrique et le diapason donnait 250 V. D.

Deprez (1) a remplacé l'étincelle électrique, peu sûre, par le signal inscripteur qui porte son nom, c'est un électro-aimant de petites dimensions et par suite de faible constante de temps. Devant les pôles de cet électro-aimant peut se mouvoir autour d'un axe

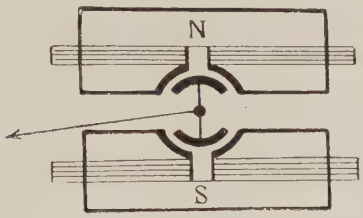


Fig. 4

une toute petite palette de fer doux munie d'un ressort antagoniste et d'un style très léger.

Sa vitesse de fonctionnement est très grande puisqu'il permet des inscriptions séparées seulement par $\frac{1}{500}$ de seconde.

MM. Abraham et E. Bloch ont construit un inscripteur appelé « oscillographe à plume » (fig. 4).

Cet appareil est constitué par une armature en fer ayant une forme analogue au double T Siemens, placée dans le champ d'un aimant permanent muni de quatre pièces polaires portant chacune un bobinage. L'armature mobile autour d'un axe perpendiculaire au champ porte un style. Si l'on envoie ou si l'on modifie le courant dans les quatre bobines mises en série, il en résulte une rotation de l'armature et un mouvement de la plume.

2° *Le chronographe Joly* (fig. 5). — Il se compose essentiellement d'un cylindre enregistreur garni de papier enfumé sur lequel un signal de Deprez et un diapason à 500 V. D. peuvent tracer des graphiques. Au déclanchement de l'appareil, le cylindre tombe en tournant autour de son axe, guidé par une vis hélicoïdale. Le mécanisme qui déclanche le cylindre libère en même temps un marteau qui vient frapper le diapason, on obtient ainsi un tracé sinusoïdal permettant la mesure précise du temps. Le signal dont l'ar-

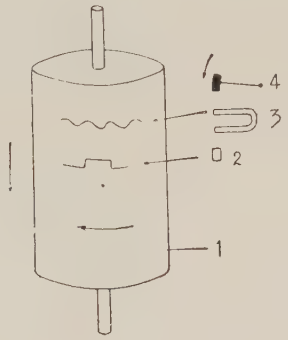


Fig. 5

1. Cylindre noirci. — 2. Electro signal.
3. Diapason 500 V.D. — 4. Maillet.

mature porte une plume donne une ligne parallèle au tracé du diapason et chaque mouvement de l'armature se traduit par un crochet. La différence de temps entre les mouvements de l'armature se mesure en comptant le nombre de périodes du diapason qui sépare les crochets dans le tracé.

5° *Appareils d'enregistrement photographique.*

1° *Appareil de M. Dufour.* — Le style inscripteur est remplacé par un rayon lumineux et la feuille de papier enfumée par une bande sensible. On obtient des tracés noirs sur fond blanc. Pour permettre des lectures faciles on complète les indications des rupteurs en inscrivant le temps sur la bande photographique. Dans le système de M. Dufour, on utilise les éclairs lumineux fournis par un

(1) *Bulletin de la Soc. Fr. des Electriciens*, n° 90, juin 1920. Conférence du commandant Pellion.

diapason entretenu électriquement à l'aide d'un numéroteur à disque entraîné par le diapason; on peut donner aux traits des éclairs des longueurs différentes permettant une lecture facile des secondes, dixièmes et centièmes de seconde. Le déroulement et le fixage de la bande sont automatiques

2° *Appareil de M. Bull.* — Dans ce système, le papier est uniformément éclairé et c'est l'image d'une corde d'un galvanomètre à corde qui sert de spot, au développement on obtient des tracés blancs sur fond noir. L'inscription du temps se fait en coupant un rayon lumineux par un disque denté entraîné à vitesse constante par un petit moteur synchronisé par un diapason à 50 V. D. Le temps est inscrit sous forme de raies transversales au film, la distance de deux raies représente un centième de seconde.

3° *Méthode de MM. L. Curtis et R. C. Duncan* (1). — Comme dans les autres appareils, on enregistre simultanément sur la

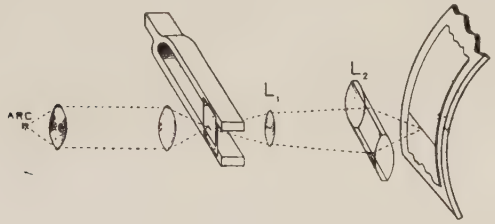


Fig. 6

bande photographique qui se déroule le phénomène à étudier et le temps.

L'inscription du temps est obtenue d'une façon originale : chaque branche du diapason porte une fente découpée dans une plaque très légère (fig. 6). Au repos, les deux fentes sont en regard et sont parallèles aux branches du diapason, elles sont vivement éclairées par un arc. Les lentilles L_1 L_2 projettent l'image de la fente sur un film qui se déroule.

Les deux fentes se retrouvent en regard deux fois par période et si le diapason donne 500 V. D. on a 1000 éclairs par seconde et par conséquent 1000 images de la fente par seconde, sur le film en mouvement Cette image sera nette s'il existe un rapport constant entre la vitesse de déplacement du film

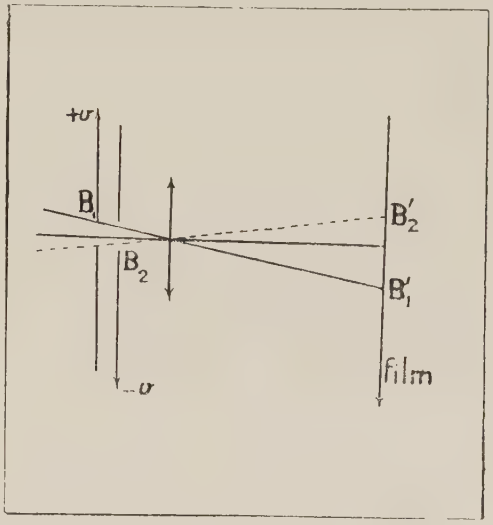


Fig. 7

et la vitesse de déplacement des bords des fentes. En effet, les deux bords de la fente B_1, B_2 (fig. 7) se déplacent à chaque instant en sens inverse avec une vitesse égale à v, en valeur absolue. L'image B'_1 du bord B_1 se déplace avec une vitesse V et l'on a $\frac{V}{v} = G$, G étant le grandissement du système de projection.

On voit de suite que l'image B'_1, qui se

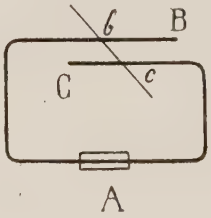


Fig. 8

déplace avec la vitesse V, sera nette *si le film se déplace avec la même vitesse V;*

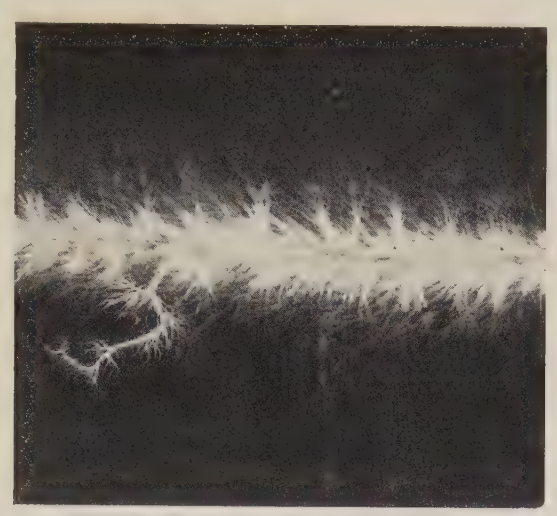
(1) *Scientific papers of the Bureau of Standards*, n° 470, avril 1923 et février 1925.

on aura ainsi sur le film en mouvement une échelle du temps formée par les images nettes et équidistantes du bord B_1. L'image du bord B_2 sur le film sera floue, la vitesse relative du déplacement de l'image B'_2 et du film étant 2 V.

Les vitesses du film réalisées par les auteurs ont varié de 53 cm/sec. à 1571 cm/sec. Pour obtenir de bonnes images, avec de grandes vitesses, il faut prendre un film de fabrication récente et très sensible et le dérouler avec une vitesse aussi constante que possible.

Avec un jeu de diapasons on mesure des temps allant de la seconde au millième de seconde.

4° *Méthodes de mesure des temps extrêmement petits.* — Nous devons réserver une mention spéciale aux méthodes permettant la mesure des temps inférieurs au millionième de seconde, car les méthodes décrites deviennent insuffisantes. Les phénomènes utilisés : propagation d'une onde sonore chute d'un poids, etc., sont trop lents. Il faut prendre des phénomènes plus rapides, utiliser par exemple la vitesse de la lumière,



Figures électriques : ions positifs.

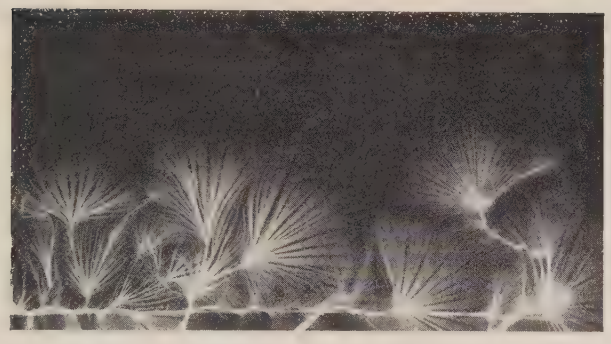


Fig. 9. — Figures électriques : ions négatifs.

la vitesse de détonation d'un cordeau détonant, la vitesse de propagation d'une onde électrique.

a) *Méthode de MM. Abraham et Lemoine* (1). — Une durée infinitésimale peut être déterminée par la mesure de l'espace que parcourt la lumière pendant cette durée. Cette méthode s'appliquera à tous les phénomènes de courte durée qui peuvent être reliés à la production d'une étincelle électrique.

Ainsi, mesurer un temps de 10^{-9} seconde revient à mesurer une longueur de 30 cm. parcourue par la lumière. C'est d'ailleurs ainsi que la mesure des longueurs d'onde fournit déjà la durée des vibrations lumineuses qui est de l'ordre de 3.10^{-14} sec.

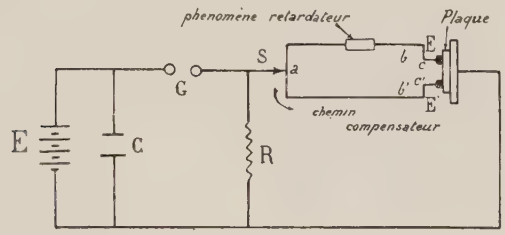


Fig. 10

b) *Méthode de M. Dautriche* (2). — Nous ne dirons qu'un mot de cette méthode qui ne peut servir qu'à mesurer des vitesses d'inflammation de cordeaux détonants.

Si on amorce en A (fig. 8) deux bouts identiques AB, BC de cordeau détonant présentant une vitesse de détonation V, très régulière et connue (cordon chronométrique), les détonations dans les deux circuits devront se croiser à des distances égales de l'origine A. S'il y a dissymétrie, le point de rencontre des ondes explosives des deux circuits se trouvera déplacé de telle sorte que les temps de parcours restent égaux dans les deux branches. Pour observer le point de rencontre et mesurer le retard, on accole les deux cordeaux B et C sur une feuille de plomb. Lorsqu'on les fait détoner en sens inverse, on observe sur la plaque une empreinte *b c*, dûe au choc des ondes. Le retard des deux ondes est égal à $\frac{bc}{v}$

M. Dautriche utilise un cordeau pour lequel V = 6880 mètres et tel qu'un déplacement de 1 m/m du signal *b c* (limite de précision) soit équivalent à $\frac{1}{6.880.000}$ seconde.

c) *Méthode de P. Heymans et N. H. Frank* (3). — Quand on applique sur une plaque sensible deux électrodes présentant une différence de potentiel, on obtient des figures électriques dont les propriétés changent avec le signe de la différence de potentiel (4). Nous donnons (fig. 9) des clichés que nous devons à l'obligeance de M. H. Ollivier. La vitesse de propagation des figures dépend de la valeur du potentiel, de la pression, de la température, de l'émulsion du grain de la plaque photographique, etc.

MM. Heymans et Frank utilisent le dispositif suivant : quand l'onde électrique résultant de l'étincelle éclatant en G (fig. 10) atteint les électrodes E E' avec un certain

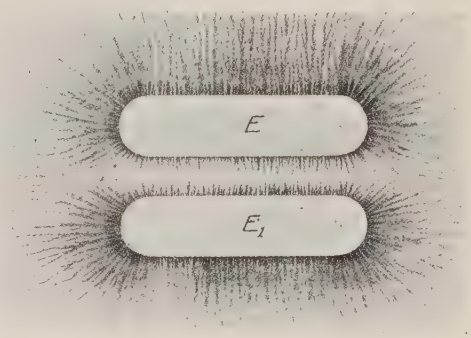


Fig. 11

décalage, les figures émises par chacune des électrodes se rencontrent suivant une ligne qui n'est pas confondue avec l'axe de symétrie du système E E'.

(1) *Ann. Chim. Phys.* 20, p. 264, 1900. — *J. de Phys.* 9, p. 262. 1900.
(2) Dautriche, C. R. 144, 1030, 1907.
(3) P. Heymans et N.-H. Frank. *Phys. Rev.* 25, p. 865, 1925.
(4) H. Ollivier. *Journal de Physique*, tome VI, p. 83, 5, juin 1925.

Si on ajoute dans le circuit allant à l'électrode retardée une longueur conductrice additionnelle l, on peut amener la ligne de rencontre à reprendre sa position médiane entre les deux électrodes (fig. 11).

Quand ce résultat est obtenu, l'intervalle de temps inconnu est égal à $\frac{l}{v}$, v étant la vitesse de propagation de l'onde électrique dans le fil, c'est-à-dire 3.10^{10} C.G.S. (1).

Dans leurs mesures la longueur compensatrice l a varié de 30 mètres à 2 cm et par conséquent l'intervalle de temps a varié de 10^{-7} à $6,7.10^{-11}$ seconde.

b) **Etude des appareils à lecture directe.**

1° Emploi du galvanomètre pour la mesure du temps.

a) *Méthode de Pouillet* (2). — Si la décharge $q = I_0\theta$ qui traverse le galvanomètre provient d'un courant constant I_0 dont le circuit a été fermé pendant un temps θ très court par rapport à la période d'oscillation de l'aiguille, la déviation α (petite) satisfait à l'équation $q = \frac{H}{G} \cdot \frac{\tau_0}{\pi} \cdot \alpha$ (1).

τ_0 étant la durée d'une oscillation simple. Soit δ la déviation permanente que donnerait le courant permanent I_0, on a :

$$\delta = \frac{G\,I_0}{H} \text{ d'où } \frac{H}{G} = \frac{I_0}{\delta}$$

portons dans (1)

$$q = I_0\,\theta = \frac{I_0}{\delta} \cdot \frac{\tau_0}{\pi} \cdot \alpha$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{\pi} \cdot \frac{\alpha}{\delta}.$$

De la mesure de la déviation α on déduit la valeur de l'intervalle de temps θ, par exemple celui que met une balle pour parcourir le canon d'un fusil. La méthode n'est applicable que si les effets d'induction sont négligeables.

b) *Méthode de Sabine* (3). — A l'instant zéro réunissons par un conducteur de résistance R (fig. 12) sans induction propre, les armatures d'un condensateur de capacité C présentant une différence de potentiel E_0. Au bout d'un temps dt très court, supprimons la communication R, les deux armatures présentent alors une différence de potentiel E.

Dans le temps dt, la charge transportée à travers R est $I.dt$ et elle est empruntée à

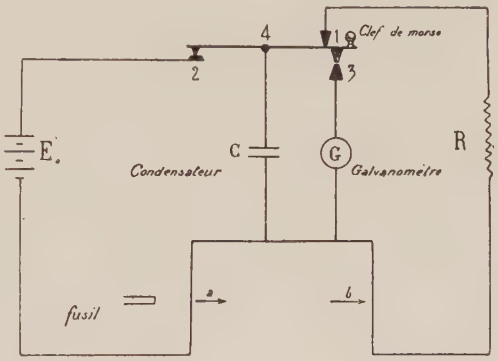


Fig. 12

l'une des armatures du condensateur dont la charge baisse de $C.dE$, on a donc :

$$I.dt = -C.dE$$

$$Idt + C.dE = O$$

$$\text{ou } \frac{E}{R} \cdot dt + C.dE = O$$

$$dt = -RC\frac{dE}{E}$$

Intégrons de O à t, on a

$$\int_0^t dt = -RC\int_{E_0}^{E} \frac{dE}{E}$$

$$t = RC\ L \cdot \frac{E_0}{E}$$

Telle est la méthode employée par Sabine

(1) Mercier. *Ann. de phys.* 20, p. 5, 1923.
(2) Pouillet. C. R., t. XIX, 1844.
(3) R. Sabine. *Philosophical Mag.* S. 5. vol. 1, 1876, p. 337, on a method of measuring very small interwals of time.

pour déterminer la vitesse des projectiles, les armatures d'un condensateur communiquent d'une part avec les pôles d'une source peu résistante qui maintient une différence de potentiel E_0 et, d'autre part, avec un fil de très grande résistance R. Les deux fils étant situés à une distance connue sur le parcours du projectile, le premier est coupé d'abord, puis le second au bout du temps T. Le rapport des différences de potentiel s'évalue soit par un électromètre, soit par les décharges correspondantes dans un galvanomètre balistique. On évalue ainsi des intervalles de temps qui ne dépassent pas 10^{-4} sec.

2° *Emploi du fluxmètre pour la mesure du temps.* — Jusqu'en 1914, le fluxmètre a été exclusivement employé à la mesure des flux. En 1914, MM. Cotton et Weiss ont été amenés à s'en servir pour la mesure des temps. Le principe de la méthode est le suivant : Si le fluxmètre est shunté, et si l'on applique aux bornes du shunt une force électromotrice E_0 pendant un temps T, l'aiguille du fluxmètre parcourt pendant ce temps T un nombre de divisions qui est proportionnel à T. Dans la deuxième partie de ce travail, nous reviendrons sur cette méthode.

Chapitre III

Nouvel appareil permettant d'obtenir des petits intervalles du temps

Principe. — Un lourd volant (fig. 13) tournant avec une vitesse angulaire ω que l'on peut regarder comme constante pendant plusieurs tours, porte deux pièces allongées D et D' dirigées suivant deux diamètres. Ces deux diamètres, solidaires du volant, font entre eux un angle constant α ; ils rencontrent successivement le plan horizontal passant par l'axe du volant à des époques séparées par l'intervalle de temps $\Delta t = \frac{\alpha}{\omega}$

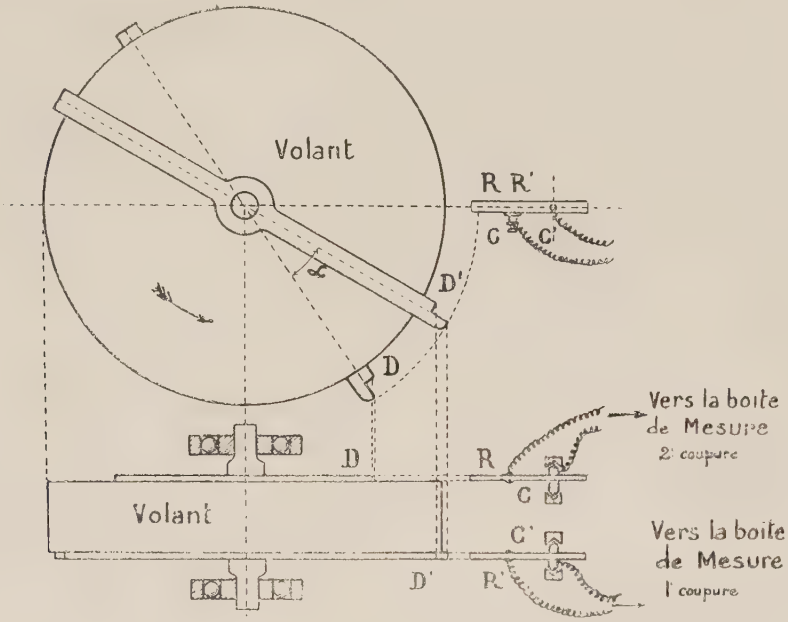


Fig. 13

Les diamètres DD' sont matérialisés et débordent la jante du volant. Pour déceler leur passage dans le plan horizontal, nous

utiliserons des appareils spéciaux RR' appelés « *rupteurs* » que DD' rencontrent dans leur rotation, provoquant des ruptures brusques de circuits électriques qui marquent les frontières de l'intervalle de temps.

Description des appareils

1° *Volant.* — Le volant utilisé existait déjà à l'Office National des Recherches Scientifiques et Industrielles et des Inventions et était destiné à faire de la cinématographie à grande vitesse. La masse est répartie vers le centre (ce qui n'était pas avantageux dans notre cas), son poids est de 220 kgs, son diamètre 100 cm. et son moment d'inertie pris par rapport à l'axe de rotation de l'ordre de 2.10^7 C.G.S.

Le volant est monté sur roulement à billes et, pour réduire au minimum les frottements, on a adopté le type de roulement le plus ré-

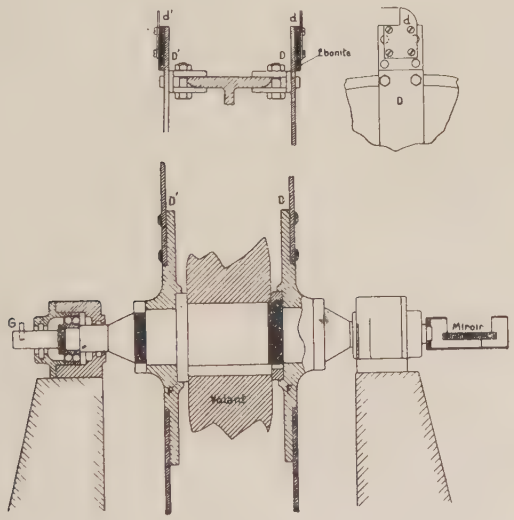


Fig. 14

duit, compatible avec la vitesse maxima donnée au système (3 tours par seconde).

Dans nos premiers essais le volant était lancé avec un moteur, mais il est très facile de le lancer à la main avec une manivelle possédant une « dent de loup » qui s'engage sur l'arbre et vient buter contre une goupille G (fig. 14).

Lorsque l'opérateur ne suit plus le volant dans sa rotation, la manivelle se décroche d'elle-même et le système est lancé. A la vitesse de un tour par seconde, le volant met

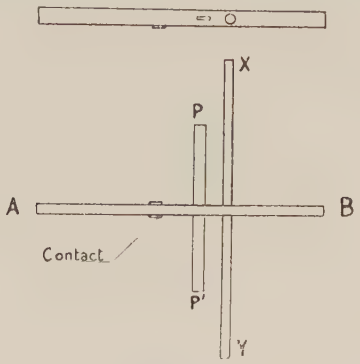


Fig. 15

45 minutes à s'arrêter, nous pouvons donc considérer la vitesse comme constante pendant la fraction de tour (1/100) qui intéresse nos mesures.

2° *Diamètres DD'.* — Sur l'arbre se trouvent chaussées des flasques FF' (fig. 14). Des pièces d'acier DD' sont fixées d'une part sur les flasques et d'autre part sur la jante. Des pièces *dd'* en acier très dur sont rapportées sur DD', elles rencontrent les rupteurs RR', elles sont isolées électriquement et fixées solidement sur DD' au moyen de vis.

La distance horizontale des pièces *dd'* est de 13 cm., la distance verticale des extrémités de *dd'* est de l'ordre du centimètre. Le choc avec RR' se fait sur une circonférence de 56 cm. de rayon, soit avec une vitesse périphérique de 3 mètres par seconde, pour une vitesse angulaire de 1 tour par seconde.

On peut fixer à l'avance, pour une série d'expériences, l'angle de calage des deux diamètres et lui donner une valeur comprise entre 0 et π radians. En agissant d'une part sur cet angle de calage, d'autre part sur la vitesse du volant, on réalise des intervalles

de temps variant de 0,5 sec. à 0,0001 sec.

3° *Rupteurs.* — Les pièces RR' appelées « rupteurs » ont pour objet :

1° De couper brutalement des circuits électriques au moment du choc avec les diamètres DD'.

2° De rendre ces coupures définitives.

Un rupteur comprend une partie mobile M et une partie fixe.

a) *Partie mobile.* — Elle est constituée par une tige à section rectangulaire AB (fig. 15) (60 × 3,5 × 2 m/m) qui porte perpendiculairement à son grand axe :

1° Un axe cylindrique XY en acier dur qui est supporté par deux roulements à billes d'alésage 4 m/m.

2° Une palette de fer doux PP' parallèle à XY.

Sur une des faces de AB se trouve soudée une petite plaque de platine qui s'appuie sur un fil d'or appartenant à la partie fixe du rupteur. Ce contact or-platine C ou C' (fig. 16) fait partie d'un circuit électrique dont il sera parlé plus loin.

Lorsqu'une expérience est prête, on provoque le choc entre les extrémités *dd'* des diamètres et les extrémités BB' des réglettes AB et A'B'. Si par exemple la vitesse linéaire de *dd'* est de 3 m/sec., les extrémités AA' sont chassées au moment des chocs avec cette vitesse de 3 mètres; la rupture des contacts or-platine est donc brusque et le choc n'apporte pas de perturbation appréciable au mouvement du volant, puisque la pièce mobile du rupteur ne pèse que quelques grammes. Nous avons ainsi obtenu un intervalle de temps Δt bien défini par les deux coupures et que nous utiliserons par la suite.

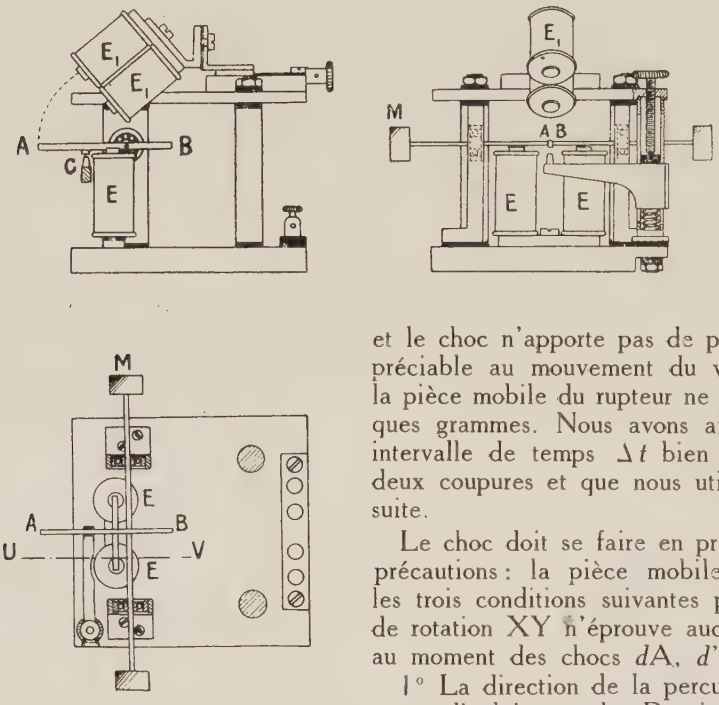


Fig. 16

Le choc doit se faire en prenant certaines précautions : la pièce mobile doit remplir les trois conditions suivantes pour que l'axe de rotation XY n'éprouve aucune percussion au moment des chocs *d*A, *d'*A'.

1° La direction de la percussion doit être perpendiculaire au plan P qui passe par l'axe fixe XY et le centre de gravité de la pièce mobile.

2° Cet axe XY doit être un des axes principaux d'inertie pour le point où il rencontre le plan qui lui est perpendiculaire et qui contient la force instantanée.

3° Enfin, la distance de la force de percussion à l'axe de rotation doit être égale à $a + \frac{K^2}{a}$, *a* étant la distance du centre de gravité du corps à l'axe XY, et K le rayon de gyration.

Le point auquel la percussion est appliquée dans le plan passant par l'axe et le centre de gravité pour qu'il n'y ait pas d'effort exercé sur l'axe fixe XY s'appelle *centre de percussion*.

Réciproquement, si le corps est en mouvement autour de l'axe, on pourra l'arrêter brusquement, sans qu'il existe aucune percussion contre l'axe, en appliquant au centre de percussion, une force instantanée perpendiculaire au plan mené par l'axe et le centre de gravité du corps. Nous avons tenu compte de cette remarque dans le dispositif qui doit arrêter la partie mobile du rupteur et rendre la coupure définitive.

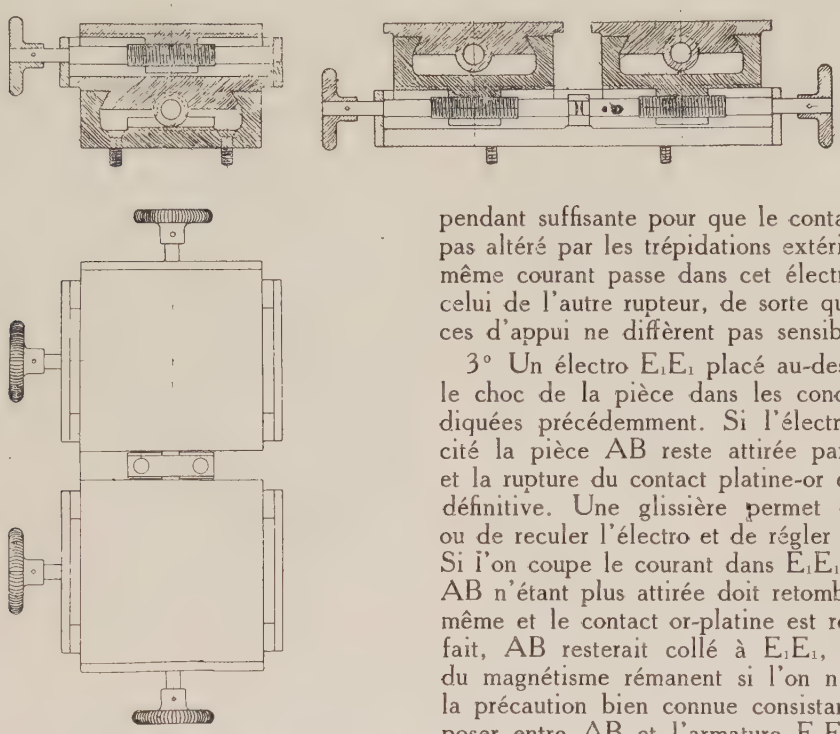


Fig. 17

b) *Partie fixe*. — Elle est constituée par des accessoires de la partie mobile. Chaque rupteur (fig. 16) comprend :

1° Une potence portant un petit cylindre d'or C qui viendra au contact de la plaquette de platine portée par la partie mobile. Une vis permet de monter ou descendre le contact et de régler *l'horizontalité* de la pièce AB.

2° Un électro EE placé au-dessous de la palette de fer doux PP' permet de régler la force d'appui du contact or-platine. Cette force, aussi faible que possible, est cependant suffisante pour que le contact ne soit pas altéré par les trépidations extérieures. Le même courant passe dans cet électro et dans celui de l'autre rupteur, de sorte que les forces d'appui ne diffèrent pas sensiblement.

3° Un électro E_1E_1 placé au-dessus reçoit le choc de la pièce dans les conditions indiquées précédemment. Si l'électro est excité la pièce AB reste attirée par l'électro et la rupture du contact platine-or est rendue définitive. Une glissière permet d'avancer ou de reculer l'électro et de régler l'entrefer. Si l'on coupe le courant dans E_1E_1, la pièce AB n'étant plus attirée doit retomber d'elle-même et le contact or-platine est rétabli. En fait, AB resterait collé à E_1E_1, par suite du magnétisme rémanent si l'on n'avait pris la précaution bien connue consistant à interposer entre AB et l'armature E_1E_1 une petite lame de cuivre que l'on soude à l'armature. Grâce à cette précaution, on ramène le rupteur dans sa position primitive en coupant le courant qui alimente l'électro E_1E_1, opération qui peut se faire à distance.

Toutes ces pièces sont soigneusement isolées électriquement les unes des autres et de la masse.

4° *Appareils de mise en place des rupteurs* (fig. 17). — Pour régler la position des rupteurs par rapport aux diamètres D et D' du volant, chaque rupteur est placé sur une plateforme qui peut se déplacer sur glissières dans deux directions rectangulaires, il est

donc facile de produire la percussion au centre défini précédemment.

5° *Supports des rupteurs et des appareils de mise en place* (fig. 18). — L'ensemble des quatre chariots et des deux rupteurs est fixé sur un lourd cylindre en acier reposant lui-même sur une butée à billes (diamètre 110 m/m). Ce cylindre porte un ergot L

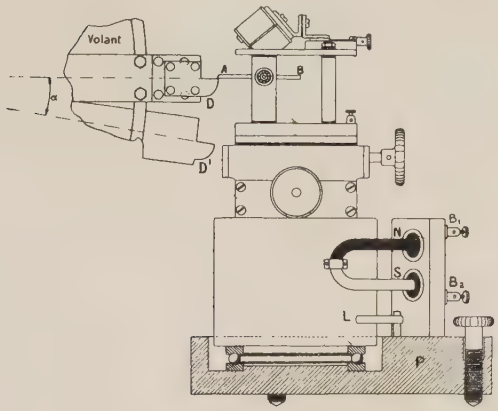


Fig. 18

placé entre deux butées feutrées fixées sur la plateforme P. On peut donc faire tourner les rupteurs sans trépidation, *afin de ne pas modifier la résistance de contact du contact platine-or.*

La rotation du cylindre est obtenue électriquement; à cet effet les branches d'un aimant N. S. solidaire du cylindre pénètrent dans les creux des bobines B_1 B_2. Il suffira de changer le sens du courant passant dans B_1 B_2 pour obtenir une rotation du bloc supportant les rupteurs dans un sens ou dans l'autre.

Pendant la préparation d'une expérience l'ergot est maintenu contre l'une des butées (butée de repos) pour qu'il n'y ait pas percussion entre un diamètre et le rupteur correspondant pendant la rotation du volant.

L'expérience étant prête, on fait tourner le cylindre en inversant le courant dans B_1 B_2 et on amène ainsi l'ergot contre l'autre butée (butée d'action), dont la position a été déterminée pour que les deux ruptures de circuit se produisent.

DESCRIPTION

DES APPAREILS DE COMMANDE AUTOMATIQUES

Etant donné le nombre de manœuvres à faire simultanément, il est indispensable de rendre toutes les commandes automatiques.

Ces commandes se font en quatre temps :

Premier temps. — On établit le courant :

— dans les électros E E qui règlent la force d'appui du contact or-platine.

— dans les électros E_1 E_1 qui recevront le choc de la pièce mobile et rendront la coupure définitive.

— dans les bobines B_1 B_2.

L'ergot L fixé au bloc supportant les rupteurs est appuyé contre la butée de repos.

Pendant que le volant tourne, l'opérateur règle les appareils qui enregistreront les deux coupures.

Deuxième temps :

— on maintient le courant dans E E.

— on maintient le courant dans E_1 E_1.

— on inverse le sens du courant dans B_1 B_2 pour faire tourner le bloc supportant les rupteurs. L'ergot L vient s'appuyer contre la butée d'action.

— on lance le courant dans l'électro-aimant qui commande l'obturateur de la chambre photographique.

Les deux ruptures se sont produites, la vibration du diapason est enregistrée sur la plaque photographique, ainsi que les traces des index lumineux venant des miroirs montés sur les axes des rupteurs (voir chapitre suivant).

Troisième temps :

— on maintient le courant dans E E.

— on maintient le courant dans E_1 E_1.

— on inverse à nouveau le sens du courant dans les bobines B_1 B_2 ; l'ergot revient contre la butée de repos.

— on coupe le courant dans l'électro qui commande l'obturateur.

L'enregistrement photographique est terminé, l'opérateur pourra faire ses mesures à loisir.

Quatrième temps :

— on maintient le courant dans E E.

— on coupe le courant dans E_1 E_1, les pièces mobiles des rupteurs tombent, le contact or-platine est rétabli.

— on maintient le courant dans B_1 B_2 de façon que l'ergot se maintienne contre la butée de repos.

Le cycle des opérations est terminé, l'appareil est revenu dans sa position initiale ; la mesure a duré à peine une minute.

Pour obtenir toutes ces combinaisons électriques nous avons fixé sur un cylindre de bois des plaques de cuivre convenablement découpées. Une paire de balais, correspondant à chaque circuit, frotte sur les lamelles de cuivre. Une manette permet de faire tourner le système toujours dans le même sens. Pour décomposer le mouvement en quatre temps, on a creusé quatre encoches sur la surface du cylindre, un galet porté par une lame de ressort arrête la rotation chaque fois qu'il vient se loger dans une encoche. L'opérateur, en passant d'une encoche à la suivante, connaît la série d'opérations qu'il a effectuée.

Chapitre IV

Appareil permettant de mesurer des petits intervalles de temps

Puisque nous savons produire des ruptures brusques, il nous reste à mesurer l'intervalle de temps qui les sépare.

On peut faire cette mesure, soit en valeur relative, soit en valeur absolue.

1° Mesure relative

Principe. — Au cours d'une mesure les deux pièces mobiles des rupteurs sont dans un même plan *horizontal*, les diamètres D D' font entre eux un angle α constant, la vitesse angulaire du volant est ω et l'intervalle de temps qui sépare les deux coupures est

$$\Delta t = \frac{\alpha}{\omega}$$

Lançons le volant et soient t_1, t_2, t_3... les instants que nous choisissons pour provoquer les ruptures ; ω_1, ω_2, ω_3... les vitesses angulaires à ces mêmes instants, notre appareil nous donnera des intervalles de temps croissants : Δt_1, Δt_2, Δt_3...

Pour comparer entre eux ces intervalles

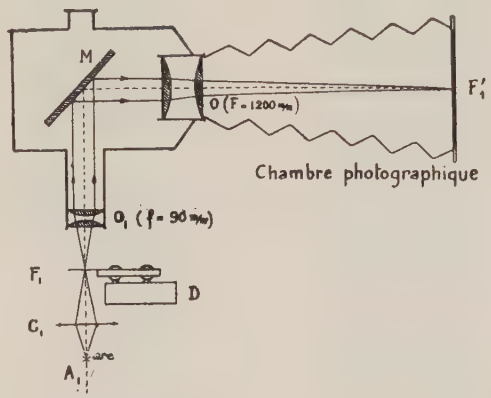


Fig. 19

de temps, il suffira de comparer les vitesses angulaires.

Un miroir plan M fixé sur l'arbre du volant (fig. 19) est entraîné par le volant dans sa rotation, il reçoit les rayons émanant d'un trou F_1 (diamètre = 0,1 m/m) porté par la branche d'un diapason D.

Un objectif O_1 de distance focale f = 90 m/m donne un faisceau de lumière parallèle qui est réfléchi par le miroir tournant M. Ce faisceau tourne avec une vitesse angulaire 2 ω et tombe sur l'objectif O (F = 1.200 m/m) d'une chambre photographique.

On obtient ainsi l'image F'_1 du trou F_1 sur une plaque photographique fixe.

Si le miroir est immobile dans la position indiquée sur la fig. 19, et le diapason aussi,

les rayons partant de F_1 et ayant suivi le trajet $F_1 O_1 M O F'_1$ donnent sur la plaque photographique une image circulaire F'_1 dont le diamètre est : $\frac{F}{f} \times 0,1 = 1,3$ m/m environ.

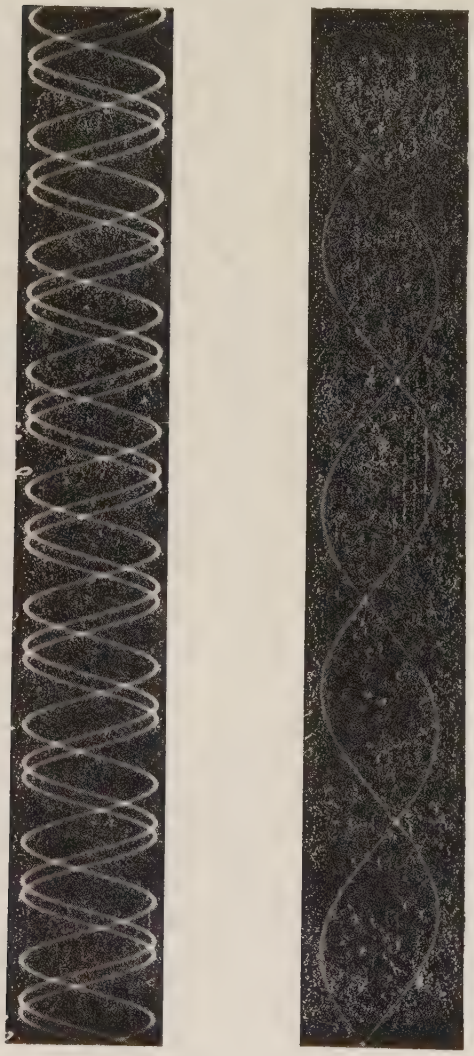


Fig. 20

Cliché n° 1 Cliché n° 2

Cliché n° 1. — Sur la photographie originale la longueur $l_1 = 23,1$ mm., représente une vibration double, soit 0,004 sec. (0,1 mm. correspond à un temps de 17.10^{-6} sec.).

Cliché n° 2. — Sur la photographie originale, la longueur $l_2 =$ 86,6 mm., représente une vibration double, soit 0,004 sec. (0,1 mm. correspond à un temps de 5.10^{-6} sec.).

Si le miroir tourne, le diapason restant fixe, F'_1 se déplace suivant une verticale sur la plaque photographique.

Si le miroir est fixe et si le diapason vibre on aura l'image de la vibration. L'amplitude de la vibration peut atteindre 40 m/m avec le diapason de 250 V. D. dont nous disposons.

Si le miroir tourne et si le diapason vibre, on aura une sinusoïde sur la plaque photographique.

La longueur de la vibration double est proportionnelle à la vitesse angulaire du volant.

Pour comparer les temps Δt_1, Δt_2, Δt_3, il suffira de mesurer les longueurs l_1 l_2 l_3 d'une vibration double sur la plaque photographique.

Pour la commodité de la lecture, on laisse inscrire sur la plaque photographique deux tours consécutifs du volant (la vitesse étant pratiquement la même pendant plusieurs tours).

Les traits correspondant à deux sinusoïdes se coupent en définissant des losanges dont il est très facile de viser les sommets (voir cliché 1, fig. 20). La distance de deux intersections représente un temps de $\frac{1}{250} = \frac{4}{1000}$ de seconde.

Ainsi sur le cliché n° 1 (fig. 20) la longueur l_1 d'une vibration double est de 23,1 m/m sur le cliché n° 2 (fig. 20) $l_2 = 86,6$ m/m.

Le quotient $\frac{l_2}{l_1} = \frac{86,6}{23,1} = 3,75$ indique que la vitesse angulaire du volant dans l'expérience était 3,75 fois plus grande que celle de l'expérience 1 et l'intervalle de temps 3,75 fois plus petit.

Dispositif expérimental

1° *Source lumineuse.* — Nous avons pris un arc automatique très puissant (25 à 30

ampères) pour éclairer le trou porté par le diapason. Il faut beaucoup de lumière, car l'image lumineuse parcourt la plaque avec une vitesse très grande.

La composante verticale de la vitesse est $V_v = 2\,\omega\,F$.

Si l'on a par exemple $\omega = 2\,\pi$ radians par sec. (1 tour par seconde), et $F = 1.200$ m/m.

$V_v = 4\pi \times 1.200 = 4.800$, soit 15 mètres-sec. environ.

Calculons la composante horizontale de la vitesse au moment du passage à la position d'équilibre (quand elle est maximum), soient : $2a$ l'amplitude de la vibration du diapason, N la fréquence, G le grandissement du dispositif optique ($G = \frac{F}{f} = 13$ environ). La vitesse de déplacement maximum est $V_H = 2\,\pi\,N\,G\,a$.

Si par exemple $2a = 2$ m/m, $N = 250$, $G = 13$, on a

$$V_H = 20 \text{ mètres.}$$

La pente de la sinusoïde est

$$\frac{V_H}{V_v} = \frac{2\,\pi\,N\,G\,a}{2\,\omega\,F} = \frac{\pi\,N\,a}{2\,\omega\,f}$$

elle est indépendante de F.

La vitesse de déplacement de l'index lumineux à son passage par la position d'équilibre est :

$$V = \sqrt{V_H^2 + V_v^2}$$

Avec notre exemple numérique, $V = 25$ mètres.

2° *Diapason*. — Le diapason de 250 V. D. à entretien électrique qui nous a servi a été construit sur les indications de M. A. Guillet, à qui nous adressons nos meilleurs remerciements. L'amplitude de la vibration, qui peut atteindre 3 m/m, donne sur la plaque photographique une vibration d'amplitude 40 m/m, elle se règle en agissant sur la distance des *contacts de charbon* au moyen d'une vis micrométrique et sur l'intensité du courant d'alimentation.

On supprime presque complètement les étincelles de rupture (qui mettraient très rapidement les contacts hors d'usage) en plaçant aux bornes d'excitation du diapason deux condensateurs de 2 μf en série avec point médian mis au sol (fig. 21).

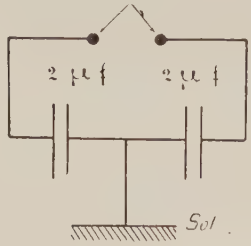


Fig. 21

Ce dispositif a servi souvent pendant des durées variant de 4 à 7 heures, sans donner le moindre ennui.

3° *Miroir tournant* (fig. 22). — Il est constitué par une glace argentée chimiquement de 8 × 8 c/m de côté. La glace est encastrée dans un bloc de laiton, elle est appuyée contre trois vis calantes au moyen d'un ressort. De cette façon on peut amener le plan du miroir à contenir l'axe de rotation du volant. Cette condition est indispensable si l'on veut que l'image soit toujours contenue dans un même plan perpendiculaire à l'axe de rotation du volant (1).

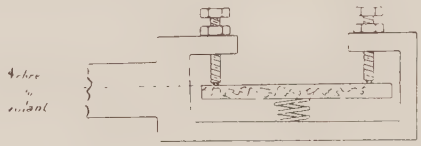


Fig. 22

4° *Chambre photographique*. — Nous avons emprunté à l'Office National des Recherches une chambre photographique d'avia-

(1) Nous avions monté en bout d'arbre un prisme à réflexion totale, mais nous avons abandonné ce dispositif par suite de la déformation de l'image réfléchie. M. Bull l'a utilisé dans son « Appareil pour la dissociation rapide des images dans la cinématographie par étincelle électrique » (C. R., t. 174, 1922, p. 1059).

tion. L'objectif de distance focale F = 1.200 m/m, de diamètre 150 m/m, est suffisamment rapproché du miroir tournant (20 c/m) pour que l'image du trou porté par le diapason soit visible pendant tout son parcours sur le verre dépoli de 24 c/m de hauteur. Le miroir tournant et l'objectif sont dans une même caisse noircie, ce qui permet de faire des photographies dans une pièce vivement éclairée. Les clichés ont pour dimension 4,5 × 24.

Un obturateur commandé par un électro-

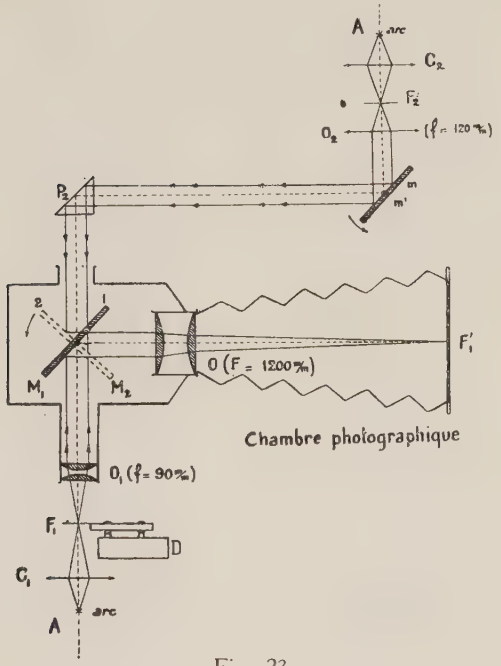


Fig. 23

plongeur permet de prendre un nombre déterminé de tours de volant. La chambre repose sur un support métallique très stable aménagé pour recevoir le diapason. Pour que les vibrations du diapason n'altèrent pas la netteté de l'image, on a placé le diapason sur une bande de mousse de caoutchouc.

5° *Plaque photographique*. — La faible quantité de lumière nous a obligé à prendre des plaques très sensibles (Lumière, étiquette violette) d'une fabrication récente. Les plaques sensibilisées étaient développées avec un bain ayant la composition suivante (pour un litre) :

Sulfite de sodium.....	75 grs
Métol	5 —
Hydroquinone	7 —
Carbonate de sodium.....	50 —
Bromure de potassium....	1 —

Nous avons obtenu un fixage très rapide avec un bain contenant 250 grs d'hyposulfite et 50 grs de sel ammoniac par litre.

II. — Mesure absolue

Principe. — On enregistre simultanément sur la plaque photographique les vibrations du diapason et les instants où les rupteurs R R' fonctionnent.

On ajoutera donc au dispositif précédent (fig. 23) un système optique qui fonctionnera dès qu'on provoquera la rupture des contacts.

Description du système optique supplémentaire. — Sur les axes des rupteurs R R' sont montés deux miroirs *m m'* avec un dispositif analogue à celui de la figure 22.

Un trou F_2 vivement éclairé par un arc A_2 est au foyer de l'objectif O_2 (f' = 120 m/m).

Le faisceau parallèle sortant de l'objectif O_2 tombe sur les 2 miroirs *m m'*. Deux cas se présentent :

1° Les miroirs sont dans le même plan, on aura un faisceau réfléchi cylindrique qu'un système de prismes redresseurs P_2 P'_2 fait tomber *sur le miroir tournant* M lié au volant. Dans la position M_2 les rayons sont réfléchis vers l'objectif O de la chambre photographique et l'on obtient une image unique du trou F_2 sur la plaque.

2° Les miroirs *m m'* font entre eux un petit angle ; on aura deux images F'_2 F''_2 du trou F_2.

Nous avons préféré nous placer dans ce dernier cas en ayant bien soin d'amener (en agissant sur les vis calantes des miroirs *m m'*) les deux images F'_2 F''_2 *à se trouver sur une même horizontale* ($F'_2 F''_2 = O$) pour ne pas avoir de correction à faire (1). Mais on

(1) Nous remercions MM. Pelletier et Aufort qui nous ont souvent aidé dans ces réglages.

peut également donner un décalage systématique aux deux images ($F'_2 F''_2 \neq O$). On mesurera la distance verticale $F'_2 F''_2$ en prenant une photographie avec l'ensemble des appareils au repos.

Si les miroirs *m m'* sont immobiles et si M tourne, on obtient deux lignes continues.

Si l'on fait tourner l'un des rupteurs, le miroir M étant au repos, le faisceau réfléchi correspondant tourne et l'index lumineux qui se déplace sur la plaque change brusquement de direction dès que l'on touche aux contacts or-platine.

Lorsque l'appareil fonctionne normalement on a sur la plaque (fig. 24) :

1° La sinusoïde S dont la période $\frac{4}{1000}$ de seconde est représentée par la longueur *l;*

2° La première coupure qui s'est faite à l'instant *a;*

3° La deuxième coupure qui s'est faite à l'instant *b*.

L'intervalle de temps qui sépare les deux coupures est représenté par la longueur $a'b - F'_2F''_2$ (dans notre cas *a' b*, puisque $F'_2 F''_2 = O$).

Il a pour valeur $\Delta t = \frac{a'b}{l} \times \frac{4}{1000}$ seconde.

Dépouillement d'un cliché. — Les longueurs *a' b* et *l* sont mesurées avec une règle étalon en verre. On place le cliché sur un verre dépoli éclairé par dessous.

Mesure de *l*. — On superpose, avec le secours d'une loupe, le trait zéro de la règle divisée à la diagonale du losange défini précédemment par l'intersection des traits des deux sinusoïdes.

On mesure ainsi la distance correspondant à une vibration double ou mieux la distance correspondant à *n* vibrations doubles. Dans la pratique, la mesure a porté sur une distance L = 20 c/m environ correspondant à *n* vibrations, par suite $l = \frac{L}{n}$

(1) La distance *a'b* varie parce que les miroirs *m m'* se sont déplacés à chaque choc ; nous avons pris soin chaque fois de ramener les images F'_2 F''_2 sur la même horizontale.

Mesure de *a' b*. — On amène la tache circulaire à être tangente au trait zéro et on a facilement *a' b*. Dans nos mesures cette distance a toujours été de l'ordre de 5 c/m, mais il serait avantageux, en modifiant l'angle de calage des diamètres D D' et des miroirs, de lui donner une valeur voisine de 20 c/m. C'est la dimension des prismes mis à notre disposition qui nous a empêché d'adopter cette valeur.

Résultats. — La figure 25 montre des clichés obtenus avec le *même* angle de calage

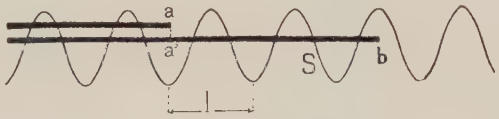


Fig. 24

des diamètres D D'. Voici les nombres qui correspondent à ces clichés :

	$a'b$ (1)	$l = \frac{L}{n}$	$\Delta t = \frac{a'b}{l} \times \frac{4}{1000}$
Cliché 1	53,1	19,44	0 sec. 01093
Cliché 2	50,0	31,155	0 sec. 00642
Cliché 3	52,9	99,7	0 sec. 00212

Précision des résultats. — L'erreur relative commise sur Δt est égale à la somme des erreurs relatives commises sur *a'b* et sur *l*.

Le dispositif utilisé permet d'évaluer une longueur à 0,1 m/m près, l'erreur relative commise sur *l* est de l'ordre de $\frac{1}{2000}$, celle commise sur *a'b* est de l'ordre de $\frac{1}{500}$, par suite l'erreur relative totale est, avec notre installation :

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{500} + \frac{1}{2000} = \frac{1}{400}$$

En prenant des prismes plus grands, comme nous l'avons déjà dit, l'erreur sur *a'b* eut été abaissée à $\frac{1}{2000}$ et l'erreur totale à $\frac{1}{1000}$

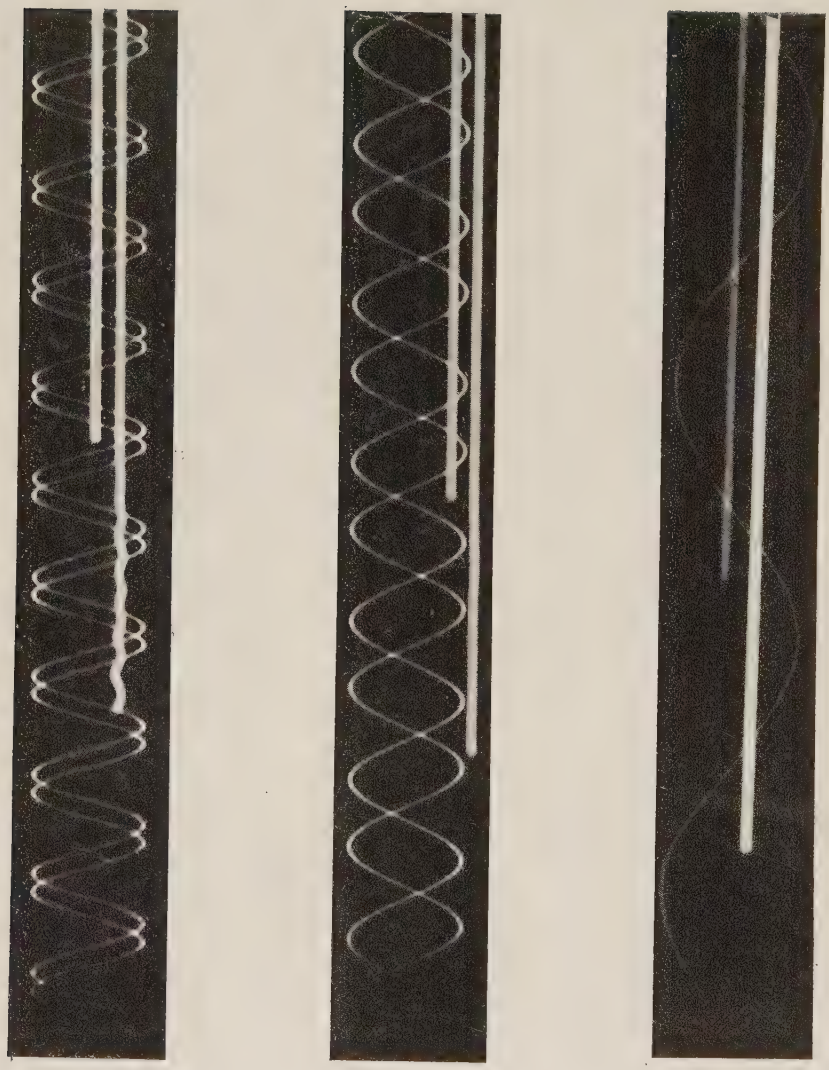


Fig. 25

Cliché n° 1 Cliché n° 2 Cliché n° 3

— Le cliché n° 1 correspond à un temps de 0,01093 sec., une des images est vibrée par suite des oscillations du support des rupteurs.

— Le cliché n° 2 est un exemple de cliché normal, il correspond à un temps de 0,00642 sec.

— Le cliché n° 3 montre qu'il faut éviter une variation d'éclat des images, sous peine d'introduire des erreurs systématiques ; il correspond à un temps de 0,00212 sec.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE V

Emploi du fluxmètre dans la mesure du temps

1° *Description du fluxmètre Grassot.* — C'est un galvanomètre à cadre mobile dont le couple de torsion W est négligeable devant le couple d'amortissement électromagnétique dans les conditions d'emploi (il en est ainsi lorsque la résistance totale du circuit contenant le cadre mobile est inférieure à 30 ohms).

Dans le fluxmètre à pivots le cadre mobile tourne autour d'un axe vertical monté sur deux pivots (fig. 26 et 27). Le léger couple de torsion provenant des spiraux S_1 S_2 d'amenée du courant (en argent recuit) est compensé approximativement, d'après une méthode indiquée par MM. Bruhat et Fortin, par un couple de sens contraire dû à la pesanteur et obtenu en déséquilibrant légèrement l'équipage mobile. Le cadre est muni d'une aiguille qui se déplace sur un cadran divisé en 200 parties dont l'étendue angulaire est d'environ 150°. Le champ radial dans lequel se déplace le cadre est constant et de l'ordre de 1.000 gauss.

2° *Fonctionnement du fluxmètre.* — Trois cas peuvent se présenter :

1° Deux bornes de l'appareil B_1 B_2 ne sont pas reliées entre elles, le cadre est très mobile et se fixe dans n'importe quel azimut.

2° Elles sont reliées par un shunt, le cadre abandonné s'arrête aussitôt, son mouvement est *freiné* d'autant plus énergiquement que le shunt a une résistance plus faible.

3° On applique aux bornes du fluxmètre *shunté* une différence de potentiel fixe E_0. L'aiguille se met en marche et sa vitesse tend rapidement vers une valeur constante d'autant plus grande que E_0 est plus grand. Le cadre devient le siège d'une force électromotrice induite qui est presque égale à E_0 en valeur absolue, il est parcouru par un courant extrêmement faible qui est juste suffisant pour vaincre les frottements. On peut alors comparer le fluxmètre à une magnéto Gramme dont l'induit de très faible moment d'inertie tourne *à vide*, c'est-à-dire sans exécuter aucun travail mécanique extérieur. Si au bout du temps t on supprime la différence de potentiel E_0, le cadre s'arrête et l'angle de rotation est proportionnel à E_0 et à t.

3° *Théorie du fluxmètre* (1). — Désignons avec Darmois et Ribaud par :

K le moment d'inertie de l'équipage mobile (30 C.G.S.).

θ la déviation angulaire de l'équipage en radians,

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$ la vitesse angulaire,

$\varphi_0 = n\,S\,H$ le flux coupé par le cadre pour une rotation de un radian,

champ de l'entrefer $H = 1000$ gauss
nombre de spires $n = 200$
S surface d'une spire $= 15$ c/m²

$\varphi_0 = 3.10^6$ U.E.M. C.G.S.

ε le couple de frottement solide (variable de 0,1 à quelques unités C.G.S.),

$\eta\omega$ le couple d'amortissement gazeux ($\eta = 1$ environ),

C le couple résiduel de torsion et de pesanteur (variable de 0 à 1 C.G.S.),

R la résistance en U.E.M. du circuit comprenant le fluxmètre,

R_0 la résistance propre du fluxmètre en U.E.M. ($R_0 = 3.10^{10}$ C.G.S.),

E_0 la force électromotrice en U.E.M., appliquée aux bornes du fluxmètre,

L la self induction du circuit comprenant le fluxmètre ($L = 1,5.10^7$ C.G.S.),

i l'intensité en C.G.S. du courant qui circule dans le cadre.

Appliquons aux bornes du fluxmètre une force électromotrice constante E_0, le cadre est parcouru par un courant i, le couple électromagnétique a pour valeur $\varphi_0 i$; si ω est la vitesse angulaire de rotation, la force contre-

(1) G. Darmois et G. Ribaud. *Ann. de Physique*, 10e série, t. II, 1924, p. 173. On trouvera le calcul de l'amortissement du cadre et des applications intéressantes du fluxmètre dans H. Ollivier, *Cours de Physique générale*, t. III (Hermann, éditeur).

électromotrice d'origine électromagnétique a pour valeur $-\varphi_0\omega$.

L'équation du mouvement de l'équipage mobile est donnée par l'équation

$$(1) \qquad K\frac{d\omega}{dt} = \varphi_0 i - \eta\omega - (\varepsilon \pm C).$$

D'autre part, le courant i est lié aux diverses forces électromotrices par la relation

$$(2) \qquad E_0 - \varphi_0\omega - L\frac{di}{dt} = Ri$$

En éliminant i entre les deux équations, on a l'équation complète du mouvement du cadre

$$(3) \quad KL\omega'' + (KR + L\eta)\,\omega' + (\varphi_0^2 + R\eta)\omega = \varphi_0 E_0 - R(\varepsilon \pm C).$$

La vitesse angulaire de régime a pour valeur

$$(4) \qquad \omega_r = \frac{\varphi_0 E_0 - R(\varepsilon \pm C)}{\varphi_0^2 + R\eta}$$

En désignant par r_1 r_2 les racines caractéristiques de l'équation (3), la vitesse angulaire ω du cadre à un instant quelconque est donnée par la formule

$$(5) \qquad \omega = \omega_r + C_1 e^{-r_1 t} + C_2 e^{-r_2 t}$$

Calcul de r_1 r_2. — Nous avons l'équation caractéristique :

$$KLr^2 + (KR + L\eta)\,r + \varphi_0^2 + R\eta = 0$$

$$\text{donc} \quad \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \end{matrix} = \frac{-KR - L\eta \pm \sqrt{(KR + L\eta)^2 - 4KL(\varphi_0^2 + R\eta)}}{2KL}$$

$$(6) \qquad \left.\begin{matrix} r_1 \\ r_2 \end{matrix}\right\} = -\frac{R}{2L} - \frac{\eta}{2K} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L} + \frac{\eta}{2K}\right)^2 - \frac{\varphi_0^2 + R\eta}{KL}}$$

Calcul de C_1 C_2. — Nous aurons les valeurs des constantes d'intégration en écrivant que $\omega = \omega' = o$ au temps $t = o$.

$$(7) \qquad \omega = \omega_r + C_1 + C_2 = o$$

$$(8) \qquad \omega' = -C_1 r_1 - C_2 r_2 = o$$

Les équations (7) et (8) donnent :

$$(9) \qquad C_1 = -\frac{r_2\,\omega_r}{r_2 - r_1} \qquad C_2 = -\frac{r_1\,\omega_r}{r_2 - r_1}$$

On voit que les formules auxquelles on aboutit sont très compliquées. Dans la pratique de la mesure du temps, pour résoudre

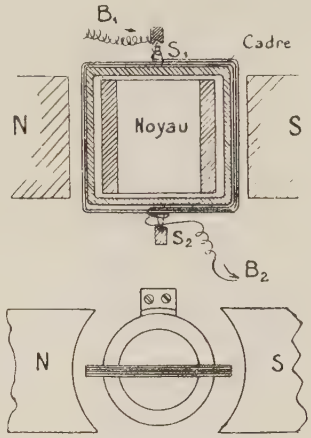


Fig. 26

et discuter ces expressions, on est amené à faire des approximations.

Mesure d'un temps au fluxmètre en première approximation. — Nous allons appliquer pendant un temps $t = t_2 - t_1$ (de l'ordre de 0,5 sec.) une *f.e.m.* E_0 aux bornes du fluxmètre en supposant :

1° que le cadre prend instantanément sa vitesse de régime ω_r ($\omega' = \omega'' = o$) ;

2° que les couples de frottement solide et gazeux sont négligeables.

L'équation (4) donne avec ces hypothèses

$$\omega_r = \frac{E_0}{\varphi_0}$$

et l'équation (3) devient

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{\varphi_0} \times E_0.$$

Intégrons de l'époque t_1 à l'époque t_2, le

déplacement angulaire total de l'aiguille sera en radians

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{1}{\varphi_0} \int_{t_1}^{t_2} E_0 \, dt$$

L'expression $\int_{t_1}^{t_2} E_0 dt$ s'exprime en volts-secondes ou mieux en millivolts-secondes. Si le régime permanent est maintenu pendant $t_2 - t_1$ secondes, on a :

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{1}{\varphi_0} \cdot E_0 \cdot (t_2 - t_1)$$

radians uem uem secondes

La déviation est proportionnelle au produit de la *f.e.m.* appliquée par l'intervalle de temps.

Transformons la formule pour faire intervenir le nombre de divisions n correspondant à $\alpha_2 - \alpha_1$ radians (1 division vaut 7.10^{-3} radians).

Si nous exprimons E_0 en millivolts (1 U.E.M. $= 10^{-5}$ millivolts), on a :

$$n = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{7{,}3 \cdot 10^{-3}} = \frac{10^5}{\varphi_0 \times 7{,}3 \cdot 10^{-3}} E_0 (t_2 - t_1)$$

millivolts sec.

puisque $\varphi_0 = 3.10^6$ U.E.M.

$$n = \frac{100}{21{,}9} E_0 (t_2 - t_1)$$

Désignons par F cette constante, qui est de l'ordre de 5 avec les fluxmètres usuels, par X la *fem* appliquée en millivolts, on a

(10) $$n = F.X.t$$

Un fluxmètre usuel dévie de 5 divisions par seconde, pour un millivolt.

Mesure d'un temps au fluxmètre en deuxième approximation. — Nous avons supposé, dans le cas précédent, que la *f.e.m.* avait une valeur constante E_0 pendant tout l'intervalle de temps T à mesurer. En réalité, il faut décomposer le mouvement en trois périodes :

1° Période qui s'écoule entre l'instant zéro où l'on établit la fem E_0 et l'instant t_0 où le cadre démarre ;

2° Période de démarrage du cadre depuis l'instant t_0 jusqu'à l'instant T où la *f.e.m.* E_0 cesse d'être appliquée et pendant laquelle le cadre tourne d'un angle θ.

3° Période d'arrêt du cadre, depuis l'instant T jusqu'au moment où le cadre devient immobile; soient T' la durée et θ' l'angle de rotation correspondant.

L'angle total de rotation de l'équipage sera :

$$\Theta = \theta + \theta'$$

Calcul de t_0. — Cette durée est toujours négligeable dans les mesures. En effet, pour que le cadre démarre il faut que l'intensité i du courant qui passe dans le cadre atteigne une valeur telle que le couple moteur $\varphi_0 i_0$ soit égal à ε (frottement solide).

Mais $$i = \frac{E_0}{R_0}\left(1 - e^{\frac{-R_0 t}{L}}\right)$$

La durée t_0 du seuil sera donnée par la formule :

$$\frac{E_0}{R_0}\left(1 - e^{\frac{-R_0 t_0}{L}}\right) = \frac{\varepsilon}{\varphi_0}$$

En développant l'exponentielle et en se limitant aux deux premiers termes, on a :

$$t_0 = \frac{L\varepsilon}{\varphi_0 E_0}$$

avec un bon fluxmèure $\varepsilon = 0{,}1$; pour évaluer un temps de l'ordre de la seconde, il faut prendre $E_0 = \frac{1}{100}$ de volt, on a par suite $t_0 = 5.10^{-5}$ sec. Pour un temps de l'ordre de 0,01 sec. on a $E_0 = 1$ volt et $t_0 = 5.10^{-7}$ sec. Ce temps sera donc toujours négligeable dans nos mesures.

Calcul de θ. — Soit ω la valeur de la vitesse angulaire à l'instant t (ω est donné par la formule 5).

On a

$$\theta = \int_0^T \omega dt = \int_0^T \left(\omega_r + C_1 e^{-r_1 t} + C_2 e^{-r_2 t}\right) dt$$

Calcul de θ'. — Désignons par ω_1 la valeur de la vitesse angulaire au bout du temps T, c'est-à-dire quand la *f.e.m.* cesse d'être appliquée. Dans le nouveau régime variable, la vitesse angulaire ω' garde la même forme

$$\omega' = \omega_1 + C_1 l^{-r_1 t} + C_2 l^{r_2 t}$$

Si T' est le temps que l'aiguille met à s'arrêter après la cessation de la *f.e.m.* E_0, on a

$$\theta' = \int_0^{T'} \omega' \, dt$$

Pour un bon fluxmètre, T' d'abord nul avec T, croît beaucoup plus vite que T et devient sensiblement constant dès que T prend une valeur notable.

Tirons un exemple de l'étude de MM Darmois et Ribaud.

Pour un très bon fluxmètre ($\varepsilon = 0,2$)

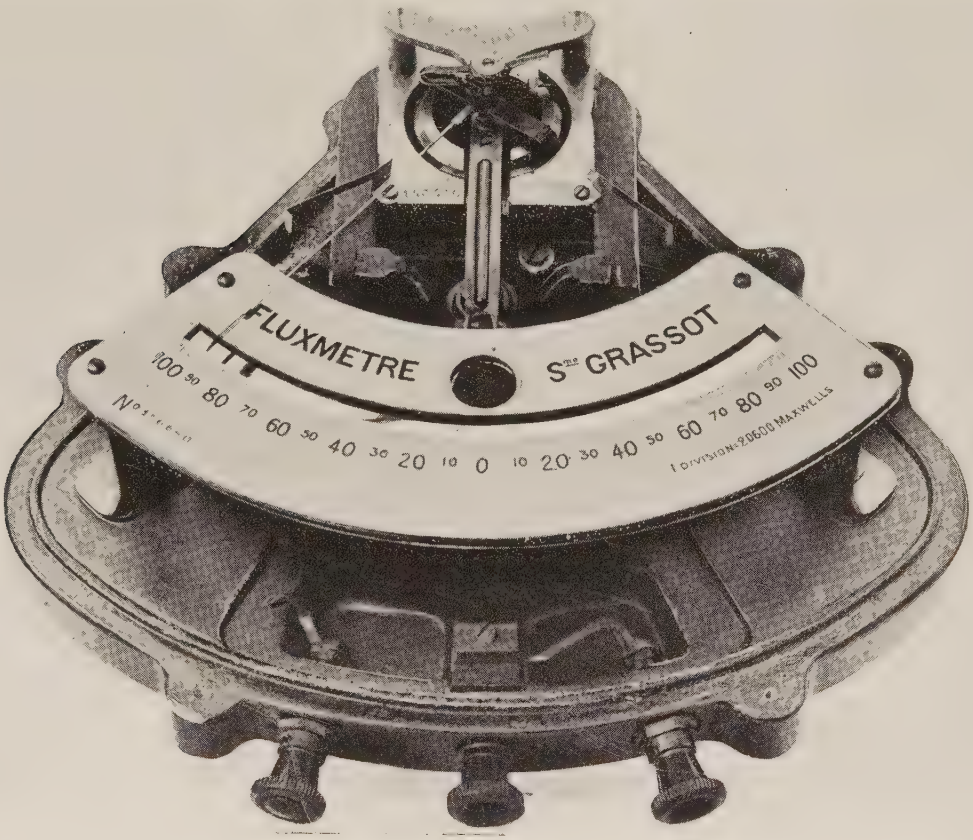


Fig. 27

Valeur de T en secondes				
0,05	0,1	0,2	0,3	0,9
Valeur de T' en secondes				
0,62	0,66	0,70	0,71	0,72

MM. Darmois et Ribaud ont donné l'expression suivante pour la déviation totale Θ :

$$(11) \quad \underset{\text{radians}}{\Theta} = \frac{E_0}{\varphi_0} T - \eta \frac{E_0 R}{\varphi_0^3} T - \frac{\varepsilon R}{\varphi_0^2} (T + T')$$

Le premier terme, qui est le plus important, est celui que nous avons trouvé à propos de la théorie élémentaire.

Le second terme, ou terme de frottement gazeux, est encore proportionnel à T.

Le troisième terme, ou terme de frottement solide, conserve toujours la même importance, puisque T + T' est toujours de

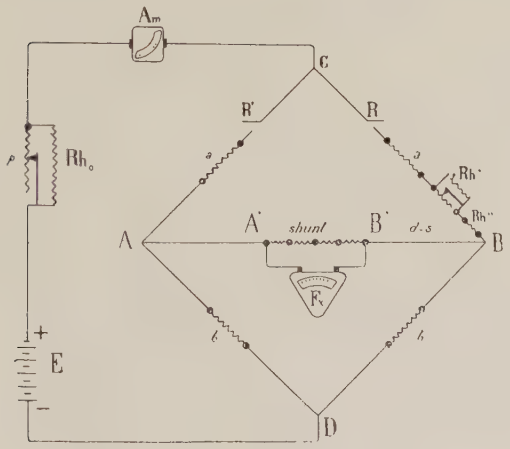


Fig. 28

l'ordre de la seconde, comme l'a montré le tableau précédent.

Précisons la valeur respective de chaque coefficient pour un bon fluxmètre ($\varepsilon = 0,1$)

$$R = 3.10^{10} \text{ U.E.M.} \quad \varphi_0 = 3.10^6 \text{ U.E.M.} \quad \eta = 1$$

$$E_0 = 1.380 \text{ millivolts} = 1,38.10^8 \text{ u.e.m.}$$

$$\Theta = 46\,T - 0,153\,T - 0,00033\,(T + T').$$

Le dernier terme étant toujours très petit on voit que même pour les temps courts la proportionnalité des déviations aux temps subsiste. Cette formule sera vérifiée dans les chapitres suivants.

4° *Emploi du fluxmètre dans la mesure du temps.* — MM. A. Cotton et P. Weiss se sont servis, pour la première fois en 1914, du dispositif suivant pour mesurer l'intervalle de temps séparant deux ruptures de circuits.

On réalise un pont de Wheatstone disposé suivant la figure 28.

Soient : a la résistance des bras CA CB qui contiennent les rupteurs R R'.
b la résistance des bras DA, DB.
d la résistance de la diagonale AB.
s la résistance du shunt A'B'.
ρ la résistance du circuit extérieur C E D.
V la *f.e.m.* de la source.

1° Lorsque le pont est équilibré l'aiguille du fluxmètre est immobile ; le courant dans le circuit extérieur mesuré par l'ampèremètre A*m* est donné par la formule :

$$I_0 = \frac{V}{\rho + \frac{a+b}{2}}$$

2° Si l'on coupe la communication entre A et G et qu'on débranche le fluxmètre, la résistance du pont est : $a + \frac{b\,(b+d)}{2\,b+d}$ et le courant mesuré à l'ampèremètre a pour valeur :

$$I_1 = \frac{V}{\rho + a + \frac{b\,(b+d)}{2\,b+d}}$$

Le courant I_2 qui passe dans la diagonale du pont est au courant I_1 dans le rapport $\frac{b}{2\,b+d}$, on a $\frac{I_2}{I_1} = \frac{b}{2\,b+d}$ et par suite

$$I_2 = \frac{Vb}{(2\,b+d)\,(\rho+a) + b\,(b+d)}$$

C'est ce courant qui passera encore dans la diagonale du fluxmètre, même si le fluxmètre est branché, puisque le cadre est parcouru par un courant très faible i_0 $\left(i_0 = \frac{\varepsilon}{\varphi_0}\right)$

Dans le cas d'un bon fluxmètre

$$i_0 = \frac{0,1}{3.10^6} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-7} \text{ U.E.M.}$$

Le courant changera légèrement, ainsi que celui mesuré par l'ampèremètre si on immobilise le cadre du fluxmètre.

La fem appliquée aux bornes du fluxmètre a pour valeur sI_2 et sa valeur maxima est dI_2.

Voici un tableau qui donne quelques exemples d'application numérique :

	1	2	3	4	5	6
V	2 volts	2	2	2	9,3	10
a	1 ohm	50	1	1	5,1	11,5
b	1 ohm	100	10	10	5	5
d	1 ohm	10	10	10	10	10
ρ	15 ohms	15,2	10	3	8	0,2
I_0	133 millis	22	129	235	775	1198
I_1	120 millis	17	113	187	550	647
I_2	40 millis	8,1	37,7	62,5	138	162
dI_2	40 millivolts	81	377	625	1380	1620

Pour les applications au repérage par le son MM. Cotton et Weiss ont fait construire des boîtes de mesure dans les conditions de la colonne 2. Pour la mesure des vitesses initiales MM. Cotton et Ollivier ont utilisé les conditions de la colonne 6.

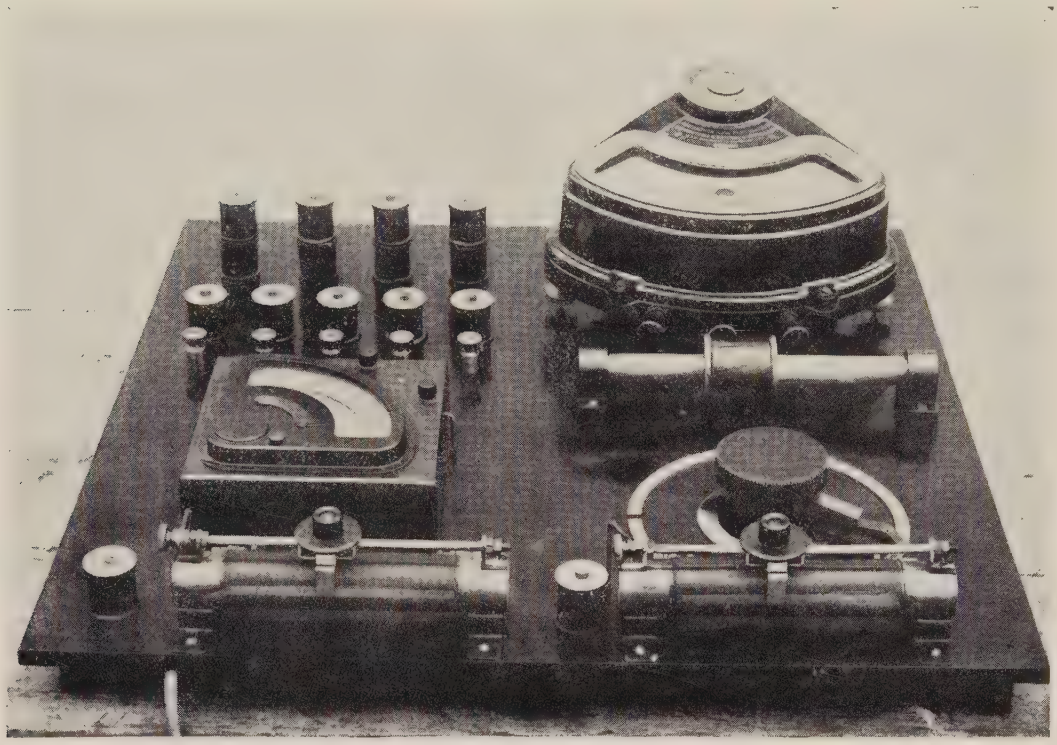


Fig. 29. — Table de mesures.

5° *Etalonnage du fluxmètre.* — L'installation fournissant les intervalles de temps a été associée à une table de mesure construite avec les données figurant dans la colonne 5.

Description de la table de mesure (fig. 28 et 29). — Les branches DA, DB sont constituées par deux bobines sans self, en manganine, de 5 ω de résistance chacune.

La branche CB comprend d'abord une bobine a de 5 ω ; elle contient en outre :

1° Le premier rupteur R.

2° Un rhéostat shunté par un rhéostat Rh'. la résistance de l'ensemble varie jusqu'à 0,2 ω.

3° Un rhéostat R*h*'' de résistance variable continument jusqu'à 0,007 ω. L'équilibre du pont, avec des courants intenses (de l'ordre de l'ampère), ne peut être obtenu que par le secours de ce rhéostat ; lorsqu'on cherche à réaliser l'équilibre avec les rhéostats *Rh* -R*h*' l'aiguille du fluxmètre dévie d'un côté ou de l'autre lorsqu'on passe d'une spire à la suivante.

Le rhéostat R*h*'' est constitué par deux couronnes circulaires C_1C_2 en maillechort (5 × 2 m/m) (fig. 30). Un fort contact à lames réunissant ces deux couronnes permet de faire varier la résistance de ε à 0,007 ω (ε désignant la résistance des deux contacts).

La branche C A est constituée par une bobine de 5,1 ω et le second rupteur R'.

La diagonale B A est constituée par 4 bobines placées en série, de résistances 7 ω, 2,5 ω, 0,4 ω, 0,1 ω, qui forment les shunts du fluxmètre.

Un fluxmètre installé à côté du pont, le plus loin possible de l'ampèremètre, est shunté à volonté par les bobines précédentes.

Marche d'une mesure. — Si les deux rupteurs R R' sont ouverts, le courant est interrompu dans tout le pont, l'aiguille du fluxmètre reste immobile.

Quand un seul des rupteurs R ou R' est ouvert, tandis que l'autre est fermé, l'aiguille du fluxmètre se met en marche.

On règle, au moyen du rhéostat Rh_0 (fig. 28), l'intensité du courant de façon à avoir une valeur convenable $I_1 = 0,550$ amp. par exemple (un seul rupteur fermé et fluxmètre débranché). Le courant gardera cette valeur constante pendant toute la durée de l'étalonnage, le courant qui passe dans la diagonale est donc bien défini et invariable, nous avons désigné par I_2 sa valeur ($I_2 = 0,138$ amp.). La *f.e.m.* appliquée aux bornes du fluxmètre est donc le produit de I_2 par la résistance du shunt choisi, sa valeur maxima est de 1380 millivolts.

Supposons les deux rupteurs fermés et le fluxmètre au zéro, c'est-à-dire le pont équilibré, l'opérateur fait tourner sa manette d'un quart de tour, les opérations du 2° temps (page 26) se font pendant qu'on surveille l'aiguille du fluxmètre.

A l'époque *t* le premier rupteur R est actionné, l'aiguille se met en marche aussitôt. A l'époque $t + \Delta t$ le second rupteur R' fonctionne à son tour, l'aiguille du fluxmètre s'arrête, elle a parcouru l'angle Θ. La plaque photographique donne l'intervalle de temps Δt ce qui permet de construire la courbe des déviations en fonctions du temps : $\Theta = f(t)$.

Le tableau ci-dessous rend compte de nos mesures, voici les constantes de l'étalonnage :

$$I_1 = 0,550 \text{ amp.}$$

$$I_2 = 0,138 \text{ amp.}$$

Le shunt avait pour valeur 10 ω donc la fem appliquée aux bornes était 1 volt 380.

1	2	3	4	5
N° des plaques	Temps en millièmes de sec.	Déviation du fluxmètre	Déviation calculée	|Cal|—|obs|
—	—	—	—	—
1	2,485	16,8	16,65	—0,15
2	3,089	20,4	20,7	+0,3
3	3,690	24,8	24,7	—0,1
4	4,598	30,8	30,8	0
5	5,252	35,1	35,2	+0,1
6	6,418	43,0	43,0	0
7	7,280	48,8	48,8	0
8	7,808	52,3	52,3	0
9	8,044	53,9	53,9	0
10	8,151	54,6	54,6	0
11	8,454	56,6	56,6	0
12	8,717	58,4	58,4	0
13	9,485	63,7	63,55	—0,15
14	10,097	67,5	67,6	+0,1
15	10,512	70,5	70,4	—0,1
16	10,755	72,0	72,1	+0,1
17	10,926	73,3	73,2	—0,1
18	11,230	75,1	75,2	+0,1
19	12,973	87,0	86,9	—0,1
20	14,730	98,6	98,7	+0,1
$\Sigma t = 164,694$		$\Sigma\theta = 1103,2$		

En faisant d'une part la somme des déviations observées (colonne 3) $\Sigma\theta = 1103,2$, d'autre part la somme des temps mesurés (colonne 2), $\Sigma t = 164,694$ millièmes de secon-

de. La constante K de l'expérience est donnée par le quotient : $K = \frac{\Sigma\theta}{\Sigma t} = 6{,}7$.

Ainsi si on applique aux bornes du fluxmètre, shunté par un résistance de 10 ohms, une fem de 1 volt 380, pendant un millième de seconde, l'aiguille du fluxmètre déviera de 6,7 divisions.

Dans la colonne 4 nous avons indiqué les déviations calculées, c'est-à-dire les déviations obtenues en faisant le produit de la constante K par le temps correspondant.

La colonne 5 donne les écarts entre les valeurs absolues du calcul et de l'observation, on voit que ces écarts sont, en général, de l'ordre de grandeur de l'erreur que l'on commet en lisant les indications du fluxmètre.

Résultats. — *Les déviations de l'aiguille du fluxmètre sont proportionnelles aux temps pendant lesquels la fem est appliquée aux bornes du fluxmètre. On a :* $\Theta = Kt$.

Dans ce qui précède, nous avons fait chaque fois une mesure du temps, mais on aurait pu faire une étude en valeur relative, vérifier que la courbe d'étalonnage était une droite et chercher la valeur du coefficient angulaire de cette droite (c'est-à-dire la constante K) pour des temps de l'ordre de 0,1 sec.

6° *Précautions à prendre au cours des mesures.* — 1° Pour que le pont reste équilibré il faut avoir des connexions très soignées, il est préférable de faire des soudures. Il faut également que les contacts or-platine C C' soient *très* propres. M. H. Ollivier a donné à ce sujet des indications fort utiles. Lorsqu'on fait une copie de réseau par application de collodion, la surface est parfaitement nettoyée. Partant de ce fait, M. H. Ollivier nettoie les deux surfaces d'un contact en y déposant une goutte de collodion et en laissant évaporer, il se forme une pellicule qui sèche, se détache spontanément en enlevant les impuretés qui souillaient la surface; à l'aide d'une pince brucelle on retire la pellicule. L'action du collodion est tellement puissante que si l'on cherchait à nettoyer par ce moyen un objet doré, on arracherait par place la dorure. M. Ollivier nettoie également une surface en la frottant avec un thermocautère, dont le fil de platine est porté au rouge par un courant électrique

2° Il faut éviter les trépidations et les chocs, en particulier lorsqu'on amène les pièces mobiles des rupteurs à la rencontre des diamètres D D'. Si cette condition n'é-

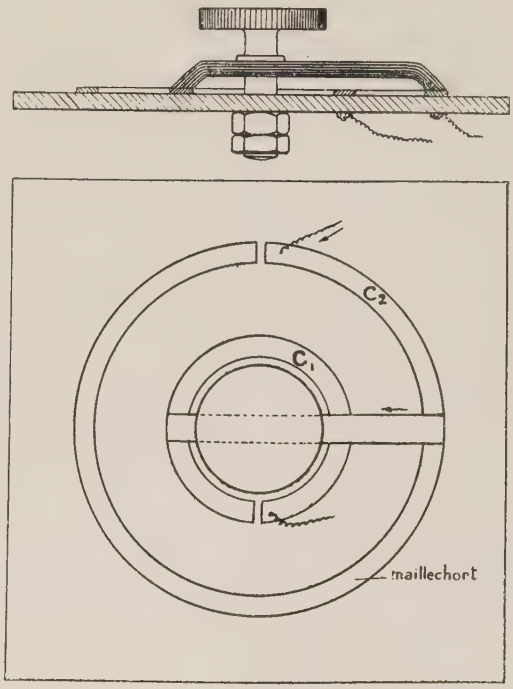


Fig. 30

tait pas remplie, le pont serait déséquilibré. Nous avons essayé différents dispositifs avant de nous arrêter à la solution qui a été décrite plus haut, c'est-à-dire un lourd cylindre C reposant sur une butée à billes et dont l'ensemble pèse une vingtaine de kilogrammes.

3° Il faut surveiller le courant qui passe dans l'ampèremètre de façon à avoir une valeur constante pendant toute la mesure. Il faut employer, de préférence, des accumulateurs bien chargés qu'on a laissé reposer pendant quelques jours.

4° Il faut bien régler l'intensité du courant dans les électros supérieurs E. E_1 des

rupteurs. C'est contre eux que la pièce mobile du rupteur vient buter, rebondir et se coller définitivement *si le rebondissement n'est pas trop fort*. Si la pièce mobile retombait, la coupure du courant ne serait pas

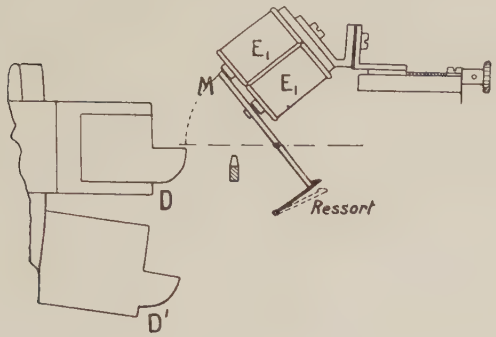


Fig. 31

définitive et le cadre du fluxmètre serait parcouru par un courant permanent qui pourrait lui être funeste. La vie du fluxmètre est à la merci d'un accident de ce genre, il serait donc utile de protéger le fluxmètre contre un rebondissement possible de la pièce mobile On peut y arriver de deux façons :

a) En amortissant au préalable le choc de l'équipage contre l'électro de retenue soit par courants de Foucault, soit en plaçant un ressort (fig. 31) muni d'une encoche. La pièce mobile M serait retenue définitivement.

b) On pourrait également mettre un fusible en série avec le fluxmètre. Comme dans les fluxmètres ainsi employés les spiraux d'amenée de courant sont la partie fragile, il suffit de faire un fusible avec le fil d'argent qui constitue ces spiraux, en ayant soin de réduire la section, de moitié par exemple. On arrivera à ce résultat en immergeant pendant le temps nécessaire, le fil d'argent dans de l'acide azotique étendu. On tend le fil entre deux bornes distantes de 3 à 4 cm. de façon à ce qu'il soit dans des conditions de refroidissement identiques à celles des spiraux. Le fusible ainsi réalisé fondra toujours avant les spiraux d'amenée de courant.

4° Avant chaque mesure il est commode d'amener l'aiguille du fluxmètre au zéro. On y parvient d'abord approximativement au moyen d'un bouton qui est sur l'appareil. Une bobine, en série avec le fluxmètre, glissant sur un tube contenant des barreaux aimantés, permet d'amener l'aiguille exactement au zéro. L'ensemble des barreaux présente un point conséquent au milieu du tube, une translation de la bobine produit une variation de flux suffisante pour provoquer un déplacement de l'aiguille pouvant atteindre une quarantaine de divisions.

5° Pour repérer la position de l'aiguille du fluxmètre, on s'arrange pour amener en coïncidence la tranche de la palette, qui constitue l'extrémité de l'aiguille, avec son image donnée par un miroir plan. Le plan de la palette est perpendiculaire au déplacement sa surface est de 1 cm² environ. Au moment où l'on applique une forte *f.e.m.* aux bornes du fluxmètre, l'aiguille part brutalement et se déforme momentanément (à la façon d'un manche de fouet). On pourrait atténuer ces déformations, qui produisent des perturbations gênantes, en utilisant un dispositif analogue à celui que l'on rencontre dans certains appareils (fig. 32). Le plan de la palette est parallèle au sens du déplacement.

Un fil très fin passant derrière une plaque blanche est tendu entre les deux extrémités de la palette. Le miroir plan donne une ima-

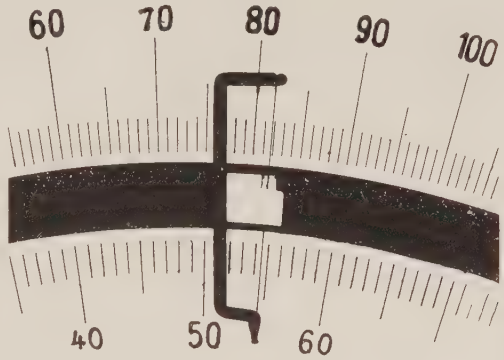


Fig. 32

ge présentant un trait noir sur fond blanc. L'aiguille se déformera moins au départ et il sera très facile pour l'observateur de placer l'œil de façon à confondre l'image et l'objet avant de faire sa lecture.

Chapitre VI

Influence de la self sur la courbe d'étalonnage

MM. Darmois et Ribaud ont démontré dans leur *Etude théorique et expérimentale du fluxmètre*, que l'introduction d'une self notable dans le circuit du fluxmètre, ne modifiait pas la courbe d'étalonnage : *l'angle total de rotation obtenu pour une durée T est la même que le circuit soit inductif ou non.*

Pour vérifier ce point, nous avons fait un étalonnage avec des temps très courts (petite valeur de α) en prenant une self importante de faible résistance ohmique.

Constantes de la sef (self de Carpentier sans fer) : $L=0,5$ henry ; $R=7$ ohms ; $\frac{L}{R}=0,07$ sec.

Constantes du pont : $I_1=0,550$ amp.

$I_0=0,770$ amp.

$a=5,4$ ω.

Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Dans la colonne 3, figurent des quantités proportionnelles aux intervalles de temps $\frac{1}{l}$, inverse de la longueur d'une vibration double).

1	2	3	4	5
Numéro d'ordre	Déviation corrigée	Quantité proportionnelle au temps	Déviation calculée	Cal — obs
—	—	—	—	—
1	6,0	117	5,85	—0,15
				Temps de l'ordre de 0 s. 0009
2	7,2	142	7,10	—0,1
3	7,4	150	7,50	+0,1
4	8,1	161	8,05	—0,05
5	8,4	170	8,50	+0,1
6	8,5	169	8,45	—0,05
7	9,0	182	9,1	+0,1
8	9,5	186	9,3	—0,2
9	11,35	229	11,45	+0,1
10	12,35	247	12,35	0
11	13,8	278	13,9	+0,1
12	14,2	287	14,35	+0,15
13	14,9	296	14,8	—0,1
14	15,0	300	15,0	0
15	15,3	310	15,5	+0,2
				de 0 s. 0025 Temps de l'ordre
16	16,55	327	16,35	—0,2

$\Sigma\theta=177,55$ $\Sigma\frac{1}{l}=3551$

Résultats. — La courbe d'étalonnage reste une droite passant par l'origine. On peut encore s'en rendre compte en cherchant le coefficient angulaire de cette droite :

Faisons : 1° la somme des déviations $\Sigma\theta=177,55$.

2° La somme des expressions $\frac{1}{l}$

$$\Sigma\frac{1}{l}=3551$$

3° Le quotient $\frac{\Sigma\theta}{\Sigma\frac{1}{l}}=0,5$

On obtient le coefficient K cherché qui nous permet de calculer les déviations pour chaque valeur de $\frac{1}{l}$.

La colonne 5 donne la différence calcul - observation. Elle montre que les écarts sont de l'ordre de grandeur des erreurs de lecture et qu'il est permis de conclure à une non-influence de la self sur la courbe d'étalonnage.

Chapitre VII

Influence du frottement gazeux sur la courbe d'étalonnage.

Pour établir les équations du mouvement du cadre et calculer la déviation totale Θ on a supposé avec Darmois et Ribaud que

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Le tableau montre en outre que pour une déviation de 50 divisions (précision $\frac{1}{500}$) obtenue soit avec

$$E_0 = 2 \text{ volts et } T = \frac{5}{1000}$$

$$\text{ou } E_0 = 1 \text{ volt et } T = \frac{1}{100}$$

$$\text{ou } E_0 = \frac{1}{10} \text{ volt et } T = \frac{1}{10}$$

La vitesse angulaire passe de 2,1 rad. par sec. à 4,7 rad. par sec. et par suite la vitesse linéaire de déplacement de l'extrémité de l'aiguille passe de 21 cm/sec. à 47 cm/sec. La variation est trop faible pour modifier d'une manière appréciable la valeur de η.

DESCRIPTION DE L'APPAREIL UTILISÉ POUR L'ÉTUDE DANS LE VIDE (fig. 33)

Le fluxmètre est placé dans une cloche retournée d'une dizaine de litres de capacité. La cloche R est maintenue sur un support S à vis calantes; la tubulure laisse passer deux tubes : l'un A se rend à la pompe à vide et à la jauge de Mac Leod, l'autre B contient deux fils de connexion noyés dans le golaz.

Les bords de la cloche sont rodés sur une dalle épaisse D en verre qui sert de fermeture. Pour obtenir un meilleur vide, une couronne de caoutchouc C est interposée entre la dalle et la cloche.

On règle l'horizontalité du fluxmètre et les déviations sont lues au moyen d'une loupe.

La *f.e.m.* appliquée aux bornes du fluxmè-

TABLEAU DES RÉSULTATS

Numéro des plaques	Déviation du fluxmètre	Quantité proportionnelle au temps	Moyenne des déviations du fluxmètre	Moyenne des quantités proportionnelles au temps	Déviation moyenne calculée	| Cal | - | obs |	Valeur du temps en seconde	Valeur de η	Valeur de la vitesse angulaire en radians
1	17,0	198							
2	17,7	205							
3	19,0	220	18,4	213,4	18,4	0	0,0027	—	1,35
4	19,1	222							
5	19,2	222							
6	20,3	235							
7	25,8	299							
8	26,0	302							
9	26,9	313	25,71	296,66	25,58	— 0,13	0,0037	1,6	1,85
10	27,4	317							
11	27,9	324							
12	31,8	368							
13	32,1	370							
14	33,1	382							
15	34,5	397							
16	35,6	410	35,07	404,75	34,90	— 0,17	0,0051	1,5	2,5
17	37,5	433							
18	37,8	437							
19	38,2	441							
20	40,2	463							
21	40,8	469							
22	46,2	532	43,55	501	43,20	— 0,35	0,0063	2,5	3,0
23	47,0	540							

tre était de 1.380 millivolts. Les expériences sont faites sous la pression réduite de 0,12 m/m de mercure.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Dans la colonne 4 figurent les moyennes des déviations, dans la colonne 5 les moyennes des expressions $\frac{1}{l}$ proportionnelles au temps.

Les cinq premières mesures déterminent la constante d'étalonnage

$$K = \frac{\Theta}{\frac{1}{l}} = \frac{18,4}{213,4} = 0,0862$$

et cette constante K permet de calculer les

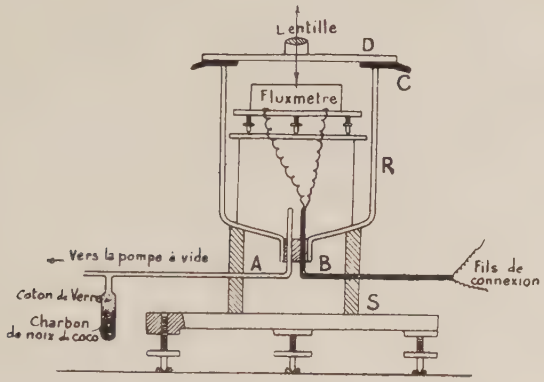


Fig. 33

déviations théoriques en admettant la proportionalité des déviations aux temps (colonne 6).

La colonne 7 donne l'expression

$$|\,\text{Cal}\,| - |\,\text{obs}\,|.$$

Cette différence est négative, ce qui confirme que les déviations sont plus grandes dans le vide que dans l'air.

La formule $\Delta\Theta = \eta \frac{E_0 R}{\varphi_0^3} T$ appliquée aux différentes moyennes nous donne les valeurs du coefficient de frottement gazeux η pour différentes valeurs de la vitesse angulaire.

Les valeurs trouvées, qui sont du même ordre de grandeur que celles trouvées par une méthode toute différente par MM. Darmois et Ribaud, montrent que η croît avec la vitesse; c'est pour une vitesse linéaire comprise entre 25 et 30 cm/sec. que l'on voit η augmenter.

CHAPITRE VIII

Etude des causes de variation de la constante du fluxmètre

Nous classerons ces causes en deux groupes :

1° Les causes de variation dues au fluxmètre lui-même;

2° Les causes de variation dues au milieu extérieur.

I. — ETUDE DU PREMIER GROUPE DE CAUSES

1° *Défauts de construction.* — Les corrections ou défauts de proportionalité des déviations aux temps peuvent tenir à plusieurs causes :

1° Erreur de tracé de la graduation;

2° Défauts de l'uniformité du champ;

3° Insuffisance de la théorie, où on néglige des termes.

Pour évaluer ces corrections on étalonne le fluxmètre avec l'appareil à chute en faisant varier la *f.e.m.* E_0 appliquée aux bornes (par exemple en modifiant la résistance du shunt). Voici les résultats de l'étalonnage du fluxmètre qui nous a servi.

Valeur du shunt du fluxmètre en ohms	Moyenne des déviations observées pour chaque shunt	Déviation calculée	| Cal | - | obs |
0.25	4.37	4.35	— 0.02
0.50	8.78	8.69	— 0.09
0.75	13.24	13.04	— 0.20
1	17.52	17.39	— 0.13
1.50	26.225	26.08	— 0.14
2	35.02	34.77	— 0.25
2.50	43.43	43.46	+ 0.03
3	52.29	52.16	— 0.13
4	69.515	69.54	+ 0.03
5	86.80	86.93	+ 0.13
6	104.36	104.32	— 0.04
7	121.31	121.70	+ 0.29
8	139.225	139.09	— 0.13
9	156.05	156.47	+ 0.42
10	173.75	173.86	+ 0.11
Total = 60.50	Total = 1051.985		

Déviation moyenne par ohm $= \frac{1051.985}{60.50} = 17,386$

Si par exemple la *déviation observée* est de 173.75, il faudra ajouter +0.11, la *déviation corrigée* des irrégularités précédentes sera de 173.86 et nous prendrons 173.9.

2° *Variations de l'aimantation.* — L'aimantation du fluxmètre peut diminuer avec le temps et la déviation lue pour une même *f.e.m.* E_0 est trop forte. Aussi est-il recommandé de faire un étalonnage de temps en temps.

3° *Déséquilibrage du fluxmètre.* — Un fluxmètre abandonné à lui-même, en parfait état, peut se déséquilibrer avec le temps; lorsqu'on abandonne l'équipage à lui-même, on voit alors l'aiguille se déplacer toute seule, rendant ainsi toute lecture impossible.

On explique ce déséquilibrage, que l'on rencontre également dans les balistiques, par le fait que les vernis isolants déposés sur le cadre travaillent, une dissymétrie se crée et l'appareil ne peut servir sans un équilibrage préalable.

Nous avons rencontré cette difficulté et nous l'avons levée en utilisant une méthode de réglage indiquée par MM. Bruhat, Fortin et Danjon.

On cherche à réaliser l'équilibrage du fluxmètre en compensant le couple de torsion C_t (toujours très faible), dû aux spiraux d'amenée de courant, par le couple de pesanteur C_p obtenu en écartant le centre de gravité de l'axe, dans le plan de symétrie.

Le fluxmètre étant en circuit ouvert, on amène l'aiguille dans différents azimuts et l'on observe dans quel sens le couple résiduel $C_p - C_t$ fait déplacer l'aiguille soit spontanément, soit sous l'influence de petits chocs. On repère ainsi sur le cadran les positions d'équilibre stable ou instable de l'aiguille.

Un fluxmètre bien équilibré par ce procédé possède une position d'équilibre instable au milieu de la graduation et deux positions d'équilibre stable aux extrémités de cette graduation.

Si le fluxmètre, par la suite, se trouve légèrement déséquilibré, on retrouvera les conditions précédentes en agissant sur les vis calantes, ce qui déplace l'axe de rotation. Lorsque l'équilibre est retrouvé, pour replacer commodément le fluxmètre dans la position d'équilibre, on amène la bulle d'air du niveau entre ses repères en agissant sur les vis

du niveau. Ce double résultat étant obtenu, le fluxmètre est à nouveau équilibré et pourra servir lorsqu'on aura pris soin de régler le niveau en agissant cette fois seulement sur les vis calantes du fluxmètre.

Si le fluxmètre est fortement déséquilibré,

Fig. 34

il faut alors agir sur les masselottes voisines du cadre et sur les vis calantes. C'est un travail long et minutieux.

Dans tous les cas l'équilibrage a changé légèrement la position du cadre dans le champ, ce qui entraîne une variation de la constante du fluxmètre et nécessite un nouvel étalonnage à l'appareil à chute.

II. — Etude des influences extérieures

1° *Influence des courants intenses sur le champ.* — Si l'un des rupteurs n'a pas fonctionné, le cadre du fluxmètre est parcouru par un très fort courant (0,1 amp. par ex.). Nous avons cherché à voir si un accident de ce genre entraîne une variation de l'aimantation. Pour cela nous avons enroulé sur l'aimant d'un fluxmètre A une bobine de surface totale $S = 1.400$ cm². Les extrémités de cette bobine étant reliées à un autre fluxmètre B.

Le cadre de A étant immobilisé (fig. 34), on lance dans ce cadre un courant de 0,1 amp. dans un sens déterminé, ce qui donne une petite déviation Θd dans le fluxmètre B relié à la bobine, puis le même courant en sens contraire, ce qui provoque une déviation θg au fluxmètre B. Voici les résultats dans différentes positions de l'aiguille :

Position 1 : aiguille calée sur la division — 80

$$\theta d = +0,3$$
$$\theta g = -0,2$$

Position 2 : aiguille calée sur la division 0

$$\theta d = \theta g = 0$$

Position 3 : aiguille calée sur la division +80

$$\theta d = -0,3$$
$$\theta g = +0,4$$

Une division du fluxmètre B valait 20.600 maxwells ; on a donc une variation de flux d'induction

$$d\varphi = 20600 \times 0,3 = 6180$$

et une variation d'induction

$$dB = \frac{6180}{1400} = \text{soit } 4 \text{ maxwells environ.}$$

Cette variation est négligeable. Remarquons également que pour une même position du cadre on a deux variations inégales

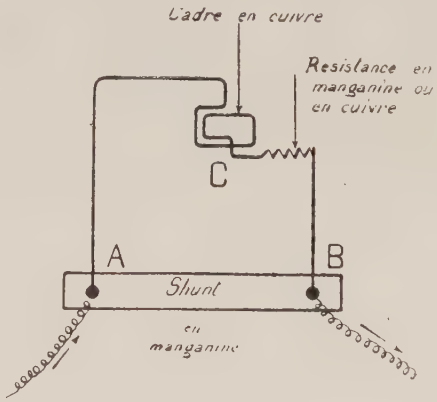


Fig. 35

de l'induction de l'acier de l'aimant suivant que le champ magnétisant du courant tend ou non à renforcer l'aimantation primitive.

Lorsqu'on se sert du fluxmètre, l'intensité du courant qui passe dans le cadre est très petite (inférieure au milliampère) ; on peut

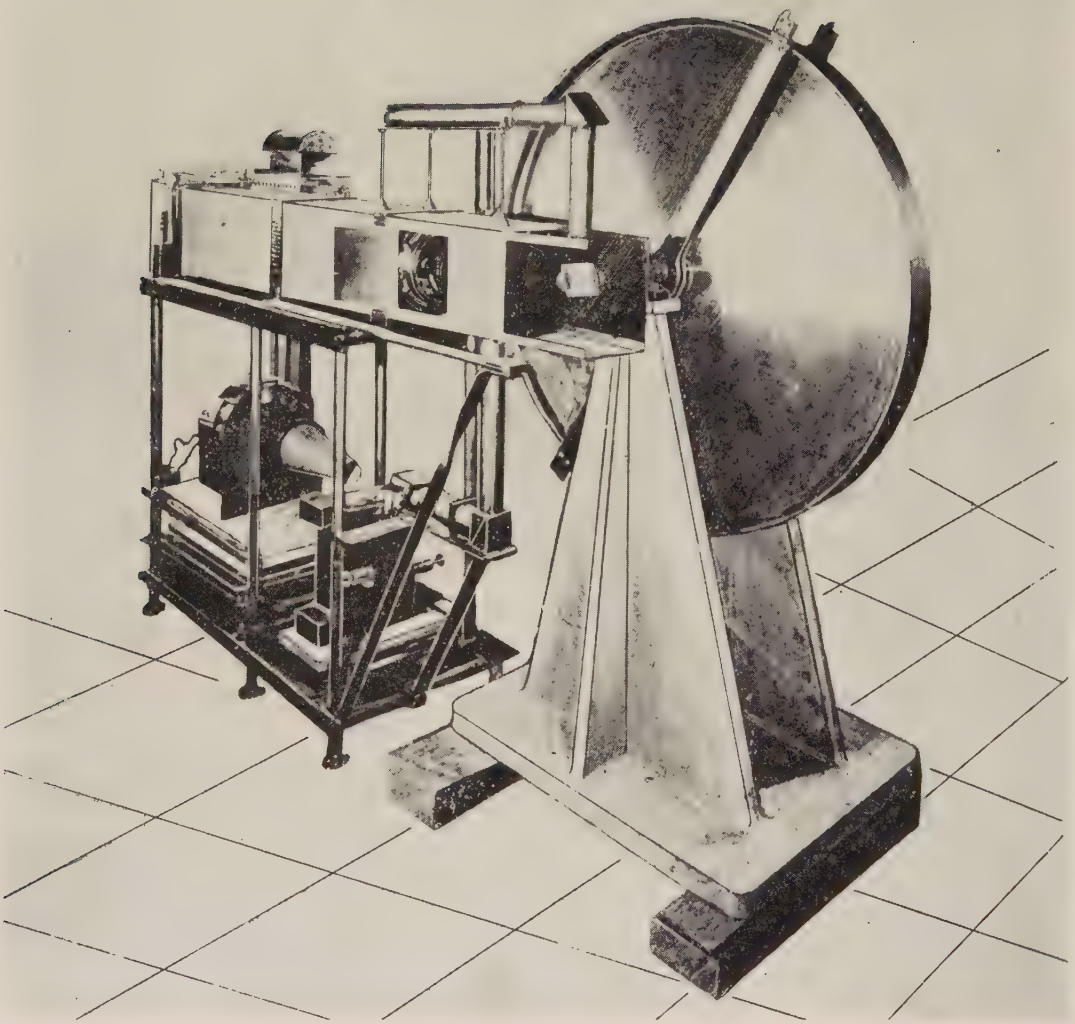


Fig. 36. — Vue montrant le volant avec ses diamètres, le miroir fixé au volant, le diapason et les supports de prisme.

donc dire que la variation de champ dans l'entrefer provoquée par le passage du courant est négligeable.

2° *Influence de la température.* — Il n'y a pas à s'occuper d'une influence de la température sur le fluxmètre puisque le courant qui le traverse est insignifiant et que l'aimant change très peu avec la température.

Il n'en est pas de même pour le milliampèremètre ou l'ampèremètre associé au cir-

cuit de mesure. Différents cas peuvent se présenter :

I. — Si l'intensité du courant est de l'ordre de quelques dizaines de milliampères, le courant passe tout entier dans le cadre du milliampèremètre et il n'y a pas lieu de faire de correction de température.

II. — Pour des intensités plus fortes, le cadre de l'ampèremètre est shunté par une résistance AB (fig. 35), l'appareil fonctionne comme millivoltmètre, la nature du shunt dépend de l'intensité du courant utilisé, et son choix n'est pas fait de la même façon par tous les constructeurs.

Pour des courants de l'ordre de l'ampère, le shunt AB est généralement en cuivre, car on est conduit à des dimensions qui ne sont pas encore excessives sans que l'échauffement soit gênant.

La dérivation ACB qui contient le cadre étant elle-même en cuivre, le coefficient de température de l'appareil reste négligeable.

Avec des courants plus intenses, pour que le shunt en cuivre ne chauffe pas, on serait conduit à des dimensions inacceptables, on prend alors le shunt en manganine dont le coefficient de température est très faible. Si alors la branche ACB était en cuivre, le coefficient de température de l'appareil serait celui du cuivre, c'est-à-dire $\frac{3}{1000}$ par degré. Pour abaisser le coefficient, la branche ACB est souvent faite en partie avec une résistance manganine, mise en série avec le cadre. La résistance totale R de la branche comprend environ $\frac{R}{3}$ en cuivre et $2\frac{R}{3}$ en manganine ; cette combinaison a alors l'avantage de faire tomber le coefficient de température à $\frac{1}{1000}$ par degré.

L'étalonnage des appareils est fait à la température de 15° environ et si la température ambiante est supérieure de x° à la température d'étalonnage, il faudra retrancher à l'indication I lue sur l'appareil, la fraction $\frac{x\,I}{1000}$.

RESUME

La première partie de ce travail a été consacrée à la réalisation d'un appareil de mesure du temps permettant d'apprécier le cent millième de seconde et de mesurer un intervalle de temps avec une erreur relative de l'ordre de $\frac{1}{500}$, qu'il serait très facile d'abaisser à $\frac{1}{1000}$.

L'appareil réalisé nous a servi à étalon-

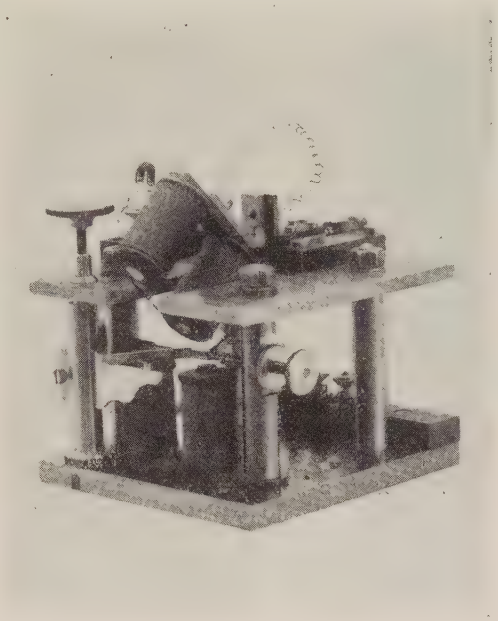


Fig. 37. — Vue d'ensemble d'un rupteur.

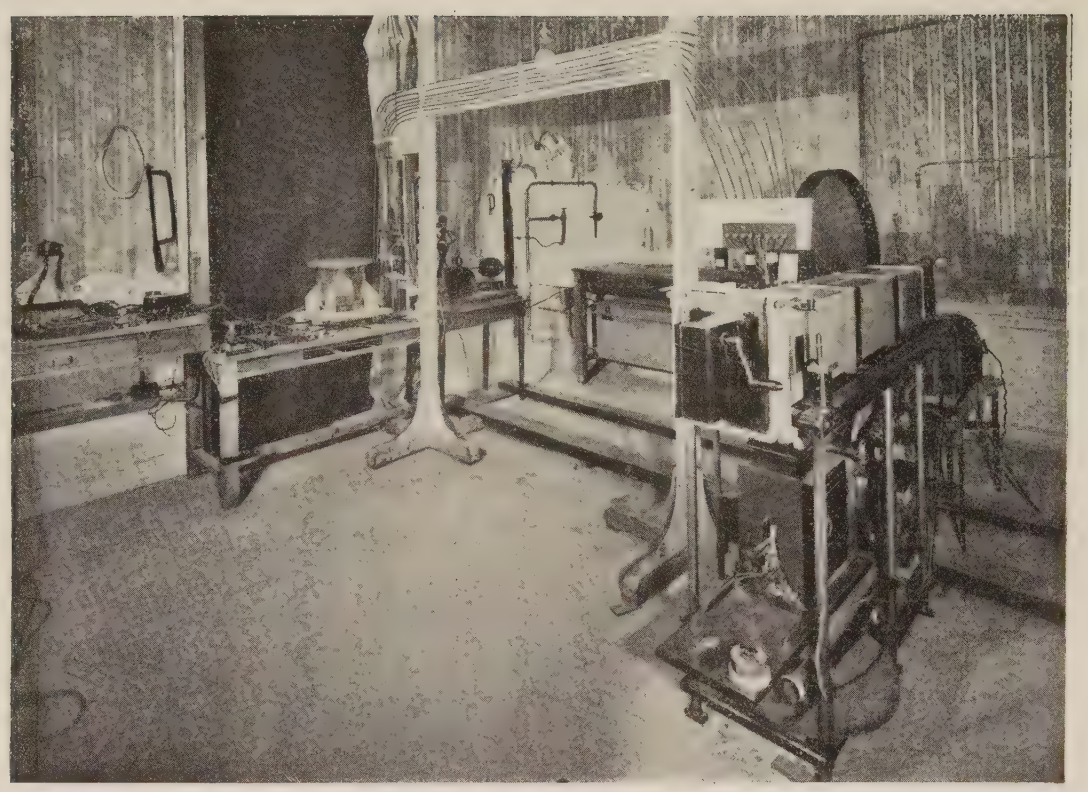


Fig. 38. — Vue d'ensemble de l'installation.

ner un fluxmètre en temps et nous a permis de vérifier que les déviations du fluxmètre restaient proportionnelles aux temps courts de l'ordre du $\frac{1}{100}$ de seconde.

Nous avons ensuite essayé d'étendre l'étude de MM. Darmois et Ribaud aux temps courts et de la vérifier, notamment en ce qui concerne l'influence de la self et du frottement gazeux. Nos mesures confirment que la self n'a pas d'action sur les indications du fluxmètre. L'étude de l'influence du frottement gazeux nous a permis de retrouver par une méthode toute différente que le coefficient d'amortissement gazeux augmente avec la vitesse angulaire lorsque la vitesse de l'extrémité de l'aiguille est de l'ordre de 0,25 m.

Enfin, dans un dernier chapitre nous avons examiné les diverses causes de variation de la constante du fluxmètre : nous avons cru en effet utile d'indiquer dans quelles conditions ce précieux instrument peut servir à des mesures très précises.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Osmose électrique et électrophorèse

Vu et approuvé :
Paris, le 20 Avril 1926,
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
M. MOLLIARD.

Vu et permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie de Paris,
P. LAPIE.

Paris. — Imprimerie F. Deshayes, 83, rue de la Santé.